

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

AREA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**Simulación numérica del proceso de mecanizado con corte
ortogonal de *Inconel 718***

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: Miguel Martos Nieto

Director/Tutor: Xavier Soldani

Universidad Carlos III de Madrid

Leganés, junio de 2017

RESUMEN

Este trabajo se centra en el estudio del comportamiento de material **Inconel 718**, una superaleación termo-resistente de base *níquel-cromo*, frente al proceso de mecanizado de *corte ortogonal* mediante *simulación* a partir de modelización numérica. El modelo numérico utilizado es el basado en la *ley de Johnson-Cook*, que define de forma numérica el comportamiento del material. Las simulaciones, bajo distintas condiciones, se han ejecutado utilizando el software **ABAQUS/Explicit**, de formulación *Lagrangiana*. Se estudia la influencia de la *velocidad de corte* en las *fuerzas de corte* y las *fuerzas de avance* y en la *morfología de la viruta*. También se estudia influencia de la *conductividad térmica* en la *frecuencia de segmentación* de la viruta. Los resultados se han comparado y validado con los de otros ensayos experimentales publicados en la literatura. Se exponen las conclusiones obtenidas durante la realización del trabajo, así como posibles trabajos futuros relacionados con el contenido de éste.

Palabras clave: Inconel, Inconel 718, Aleación termo-resistente, modelización numérica, ABAQUS, corte ortogonal, simulación, método de elementos finitos (FEM).

ABSTRACT

This project focuses on the mechanical behaviour of Inconel 718, a thermo-resistant nickel-chromium-based superalloy, in orthogonal cutting through the numerical modeling of the material. The numerical model used has been developed with the commercial code ABAQUS/ Explicit, based on Lagrangian formulation. Johnson-Cook's material law defines the equations that obey the mechanical behaviour of the material. In the project, the influence of the cutting velocity on the cutting forces and the chip morphology is studied. Also if the frequency of segmentation of the chip is influenced by the thermal conductivity. To validate the numeric model, the results of the cutting forces obtained from the simulation are compared with the cutting forces of experimental test from previous work of some authors. Conclusions reached during the whole project are shown as well as possible future works related to the content of this project.

Keywords: Inconel, Inconel 718, thermo-resistant alloy, numeric model, ABAQUS, orthogonal cutting, simulation, finite element method (FEM).

Estructura de la memoria.....	12
Apartado I.....	14
1. Introducción.....	14
1.1. Motivación	14
1.2. Objetivos	14
1.3. Etapas	15
1.4. Medios empleados.....	15
Apartado II.....	16
2. Estado del arte	16
2.1. Inconel 718.....	16
2.1.1. Propiedades mecánicas y características.....	16
2.1.2. Aplicaciones en la industria	18
2.2. Mecanizado	19
2.2.1. Introducción al mecanizado	19
2.2.2. Fundamentos del arranque de viruta	20
2.2.3. Movimientos en el arranque de viruta	20
2.2.4. Magnitudes de corte	21
2.2.5. Morfología y formación de la viruta.....	22
2.2.6. Corte ortogonal	23
2.2.6.1. Magnitudes en el corte ortogonal.....	24
2.2.7. Mecanizado en Inconel 718	26
2.3. Método de elementos finitos (FEM)	27
Apartado III	30
3. Modelo numérico.....	30
3.1. Características del modelo	30

3.2. Ecuaciones constitutivas del modelo.....	34
3.2.1. Ley de comportamiento del material	35
3.2.2. Ley de daño	35
3.3. Parámetros estudiados y proceso de simulación.....	36
Apartado IV	38
4. Datos experimentales.....	38
4.1. Presiones experimentales de corte y de avance.....	38
Apartado V	42
5. Resultados.....	42
5.1. Resultados de la simulación	42
5.1.1. Estudio de las fuerzas de corte y de avance.....	42
a) Conductividad térmica variable.....	43
b) Conductividad térmica constante.....	46
c) Comparación de las fuerzas obtenidas en cada simulación.....	53
d) Influencia de la velocidad en las fuerzas de corte y avance	53
5.1.2 Estudio de la morfología de la viruta	54
a) Conductividad térmica variable con la temperatura:	54
b) Conductividad térmica constante:	57
5.1.3. Estudio del efecto de la conductividad térmica sobre la frecuencia de segmentación	61
5.2. Comparación con los resultados experimentales y validación del trabajo realizado.....	63
a) Conductividad térmica constante.....	68
b) Conductividad térmica variable con la temperatura	70
Apartado VI.....	73
6. Conclusiones y trabajos futuros.....	73

6.1. Conclusiones	73
6.2. Trabajos futuros.....	74
Apartado VII.....	75
7. Marco regulador	75
7.1. Patentado del modelo numérico	76
Apartado VIII	78
8. Análisis del entorno socio-económico.....	78
8.1. Presupuesto.....	78
8.2. Impacto ambiental	78

Índice de figuras

Figura 1. Arranque de viruta con filos determinados (a y b) y con filos no determinados (c).....	19
Figura 2. Corte ortogonal y corte oblicuo.	20
Figura 3. Tipos de viruta	23
Figura 4. Parámetros de medición de viruta.	23
Figura 5. Ángulos en el corte ortogonal.	24
Figura 6. Velocidad de corte (V_c), de deformación (V_s) y de salida de viruta (V_v).	25
Figura 7. Fuerza de corte (F_c), fuerza de deslizamiento (F_s) y fuerza de rozamiento (F_r) en el corte ortogonal.	26
Figura 8. Ejemplos de aplicación del Método de Elementos Finitos con ABAQUS [4] [5].	29
Figura 9. Esquema del modelo numérico y condiciones de contorno.	31
Figura 10. Detalle del mallado del modelo numérico.	31
Figura 11. Conductividad térmica en función de la temperatura para Inconel 718 [6]..	34
Figura 12. Presiones de corte experimentales.	38
Figura 13. Presiones de avance experimentales.	39
Figura 14. Ejemplo gráfico de fuerzas de corte y de avance.	42
Figura 15. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica en función de la temperatura y $V_{corte}=1\text{m/s}$	43
Figura 16. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica en función de la temperatura y $V_{corte}=2\text{m/s}$	43
Figura 17. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica en función de la temperatura y $V_{corte}=3\text{m/s}$	43

Figura 18. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica en función de la temperatura y $V_{\text{corte}}=4\text{m/s}$	44
Figura 19. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica en función de la temperatura y $V_{\text{corte}}=5\text{m/s}$	44
Figura 20. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica en función de la temperatura y $V_{\text{corte}}=8\text{m/s}$	44
Figura 21. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica en función de la temperatura y $V_{\text{corte}}=10\text{m/s}$	45
Figura 22. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica en función de la temperatura y $V_{\text{corte}}=14\text{m/s}$	45
Figura 23. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica en función de la temperatura y $V_{\text{corte}}=15\text{m/s}$	45
Figura 24. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica constante y $V_{\text{corte}}=1\text{m/s}$	46
Figura 25. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica constante y $V_{\text{corte}}=2\text{m/s}$	46
Figura 26.. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica constante y $V_{\text{corte}}=3\text{m/s}$	46
Figura 27.. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica constante y $V_{\text{corte}}=4\text{m/s}$	47
Figura 28. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica constante y $V_{\text{corte}}=5\text{m/s}$	47
Figura 29. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica constante y $V_{\text{corte}}=8\text{m/s}$	47
Figura 30. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica constante y $V_{\text{corte}}=10\text{m/s}$	48
Figura 31. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica constante y $V_{\text{corte}}=14\text{m/s}$	48

Figura 32. Fuerzas de corte y de avance promedio estable. Conductividad térmica en función de la temperatura.	51
Figura 33. Fuerzas de corte y de avance promedio total. Conductividad térmica en función de la temperatura	51
Figura 34. Fuerzas de corte y de avance promedio estable. Conductividad térmica constante	52
Figura 35. Fuerzas de corte y de avance promedio total. Conductividad térmica constante	52
Figura 36. Morfología de la viruta a $V=1\text{m/s}$ y cond. térmica en función de la temperatura.	54
Figura 37. Morfología de la viruta a $V=2\text{m/s}$ y cond. térmica en función de la temperatura.	54
Figura 38. Morfología de la viruta a $V=3\text{m/s}$ y cond. térmica en función de la temperatura.	55
Figura 39. Morfología de la viruta a $V=4\text{m/s}$ y cond. térmica en función de la temperatura.	55
Figura 40. Morfología de la viruta a $V=5\text{m/s}$ y cond. térmica en función de la temperatura.	55
Figura 41. Morfología de la viruta a $V=8\text{m/s}$ y cond. térmica en función de la temperatura.	56
Figura 42. Morfología de la viruta a $V=10\text{m/s}$ y cond. térmica en función de la temperatura.	56
Figura 43. Morfología de la viruta a $V=14\text{m/s}$ y cond. térmica en función de la temperatura.	56
Figura 44. Morfología de la viruta a $V=15\text{m/s}$ y cond. térmica en función de la temperatura.	57
Figura 45. Morfología de la viruta a $V=1\text{m/s}$ y cond. térmica constante.	57
Figura 46. Morfología de la viruta a $V=2\text{m/s}$ y cond. térmica constante.	58

Figura 47. Morfología de la viruta a $V=3\text{m/s}$ y cond. térmica constante.	58
Figura 48. Morfología de la viruta a $V=4\text{m/s}$ y cond. térmica constante.	58
Figura 49. Morfología de la viruta a $V=5\text{m/s}$ y cond. térmica constante.	59
Figura 50. Morfología de la viruta a $V=8\text{m/s}$ y cond. térmica constante.	59
Figura 51. Morfología de la viruta a $V=10\text{m/s}$ y cond. térmica constante.	59
Figura 52. Morfología de la viruta a $V=14\text{ m/s}$ y cond. térmica constante.	60
Figura 53. Gráfica de la frecuencia de segmentación frente a la velocidad de corte.	62
Figura 54. Presiones de corte y de avance promedio estable. Conductividad térmica en función de la temperatura.	66
Figura 55. Presiones de corte y de avance promedio total. Conductividad térmica en función de la temperatura.	66
Figura 56. Presiones de corte y de avance promedio estable. Conductividad térmica constante.	67
Figura 57. Presiones de corte y de avance promedio total. Conductividad térmica constante.	67
Figura 58. Presiones de avance, promedio estable. Cond. térmica constante.	68
Figura 59. Presiones de avance, promedio total. Cond. térmica constante.	68
Figura 60. Presiones de corte, promedio estable. Cond. térmica constante.	69
Figura 61. Presiones de corte, promedio total. Cond. térmica constante.	69
Figura 62. Presiones de avance, promedio estable. Cond. térmica en función de la temperatura.	70
Figura 63. Presiones de avance, promedio total. Cond. térmica en función de la temperatura.	70
Figura 64. Presiones de corte, promedio estable. Cond. térmica en función de la temperatura.	71
Figura 65. Presiones de corte, promedio total. Cond. térmica en función de la temperatura.	71

Índice de tablas

Tabla 1. Composición de Inconel 718 [2]	17
Tabla 2. Propiedades de Inconel 718l [3]	17
Tabla 3. Geometría del modelo.	32
Tabla 4. Propiedades del material y de la herramienta.....	33
Tabla 5. Variables de la ley de comportamiento de Johnson-Cook para Inconel 718. ..	35
Tabla 6. Variables de la ley de daño de Johnson-Cook para Inconel 718 [7].	36
Tabla 7. Dureza de los recubrimientos empleados en los ensayos experimentales de Devillez et al. [8].	40
Tabla 8. Fuerzas promedio obtenidas en la simulación con la conductividad térmica en función de la temperatura.	49
Tabla 9. Fuerzas promedio obtenidas en la simulación con la conductividad térmica constante	50
Tabla 10. Frecuencia de segmentación para cada tipo de simulación.	61
Tabla 11. Presiones de corte y de avance con conductividad térmica en función de la temperatura.	64
Tabla 12. Presiones de corte y de avance con conductividad térmica constante.....	65

Estructura de la memoria

La estructura de la memoria de este Trabajo Fin de Grado es la siguiente:

Apartado I: Introducción: Se motiva la ejecución del trabajo, los objetivos a conseguir, las etapas del proyecto y los recursos empleados.

Apartado II: Estado del arte: Se centra en el estudio de los materiales y tecnologías que focaliza este proyecto: *Inconel 718*, sus propiedades, aplicaciones, características; conceptos básicos sobre el mecanizado para la mejor comprensión de la memoria; y el método de elementos finitos, utilizado por el software **ABAQUS** que realiza las simulaciones estudiadas a lo largo del proyecto.

Apartado III: Modelo numérico: En este capítulo se hace una introducción al *método de los elementos finitos* (MEF), que es el que se ha utilizado para la realización de las simulaciones, utilizando unos parámetros fijos para todas las simulaciones y variando otros parámetros para cada simulación. Se detallarán las características del modelo y las ecuaciones constitutivas del modelo que determinan su comportamiento mecánico. Por último, se mencionarán cuáles son los parámetros que se han analizado para realizar el presente proyecto.

Apartado IV: Datos experimentales: Para comparar los resultados de las simulaciones generadas a partir del modelo numérico y demostrar la validez de éste, se detallarán los datos experimentales obtenidos de distintos ensayos y se explicará la motivación de cada uno.

Apartado V: Resultados: Se explicitarán los resultados obtenidos de las simulaciones, y se analizarán por comparación con los datos experimentales obtenidos en la literatura

Apartado VI: Conclusiones y trabajos futuros: En este apartado se expondrán las conclusiones obtenidas durante la realización del proyecto y futuros trabajos, relacionados con el actual, que pueden mejorar el proceso de mecanizado del Inconel 718.

Apartado VII: Marco regulador: La protección de los modelos numéricos se lleva a cabo a través de una serie de reivindicaciones recogidas la Decisión "T 1227/05 (Circuit simulation I/Infineon Technologies) of 13.12.2006" acerca del Artículo 52 "Invenciones patentables" de la Convención Europea de Patentes.

Apartado VIII: Análisis del entorno socioeconómico: En él se encuentra el presupuesto del actual proyecto y se desarrolla el impacto ambiental en el proceso de mecanizado de *Inconel 718*.

Apartado I

1. Introducción

1.1. Motivación

Inconel 718 es una superaleación de base Níquel-Cromo, de gran resistencia a la corrosión, utilizada en aplicaciones a altas temperaturas. La facilidad con que se fabrica *Inconel 718* y su económico precio, combinado con una gran resistencia a la tensión, fatiga, fluencia y fractura, permiten que esta aleación sea empleada en un ampliamente en la industria aeroespacial, la ingeniería marina y en el sector de reactores nucleares. Ejemplos de estas aplicaciones son: tanques de combustible de cohetes; fuselaje y distintas partes metálicas en aviación; turbinas de gas, etc.

Inconel® es una marca registrada usada como prefijo para más de veinte diferentes aleaciones de metales resistentes a altas temperaturas y corrosión. Es producido por *Special Metals Corporation* [1], empresa líder en la invención, producción y distribución de productos derivados de aleaciones de alto contenido en níquel para ingeniería crítica.

Se trata de una aleación de difícil maquinabilidad, caracterizada porque la presión de corte y la temperatura de corte son inversamente proporcionales a la velocidad de corte en mecanizado a altas velocidades. Es importante para la industria conocer cómo afecta el cambio de la velocidad de corte a la integridad superficial de *Inconel 718* en el proceso de mecanizado.

Avanzar en el conocimiento de este comportamiento es el objetivo de este trabajo. Para ello se ha procedido a la simulación del proceso de mecanizado de *Inconel 718* mediante corte ortogonal. En el proceso de simulación se estudiarán las fuerzas que intervienen en el corte, la morfología de la viruta y la frecuencia de segmentación, y se cotejarán con valores experimentales publicados en la literatura.

1.2. Objetivos

El principal objetivo del presente proyecto es simular el proceso de mecanizado del material *Inconel 718* a alta velocidad y en corte ortogonal para mejorar el conocimiento del comportamiento del material. Se estudiará cómo influye la *velocidad de corte*, tanto

en las *fuerzas de corte*, como en la *morfología de la viruta* producida; y si la *frecuencia de segmentación* se ve afectada por la *conductividad térmica*.

La ejecución de estas simulaciones será de gran utilidad en futuros estudios, ya que reducirá, tanto los tiempos de cálculo a emplear, como el recurso a otros costosos tipos de ensayos.

1.3. Etapas

Para la realización de la simulación se diferencian dos etapas:

- Realización del modelo numérico de estudio para lanzar en el programa **ABAQUS**, en el cual se introducen los parámetros fijos del material, así como parámetros variables (velocidad de corte y conductividad térmica). Posteriormente este modelo será el utilizado en las simulaciones.
- Ejecución de las simulaciones y comparación de los datos obtenidos con la literatura publicada acerca de datos experimentales.

1.4. Medios empleados

Para realizar las simulaciones se ha utilizado el programa comercial **ABAQUS/explicit**, software CAE de análisis por elementos finitos, empleado para simular y resolver sucesos dinámicos o de conducta no lineal ante situaciones de caída libre, choques e impactos. Es un software de producción en ingeniería que facilita pre y post análisis. **ABAQUS** es un producto de *Dassault Systèmes Group*.

Los métodos de elementos finitos son muy utilizados ya que permiten cálculos complejos acortando los tiempos de ensayo y sus costes, y reduciendo la construcción de caros prototipos que han de ser corregidos de forma iterativa.

Apartado II

2. Estado del arte

Para la completa comprensión del proyecto se expone el estado del arte en estos tres temas: el material *Inconel 718*, el proceso de mecanizado y el método de elementos finitos

El primer tema comprende una descripción de *Inconel 718*, sus propiedades, características, aplicaciones y usos en la industria.

A continuación, se analiza el proceso de *mecanizado* y se profundiza en el proceso de *corte ortogonal*, utilizado en las simulaciones de este proyecto.

Por último, se explica en qué consiste el método de elementos finitos, en el que se fundamenta el software utilizado.

2.1. Inconel 718

2.1.1. *Propiedades mecánicas y características*

Inconel 718 es una superaleación austenítica de base Níquel-Cromo, con gran resistencia a la corrosión, fractura, fatiga y fluencia.

Debido a su elevada proporción de hierro es un material que endurece por precipitado y, además, es relativamente barato

En la *tabla 1* aparecen los elementos que componen esta aleación.

Las propiedades de *Inconel 718* se muestran en la *tabla 2*.

Tabla 1. Composición de Inconel 718 [2]

Composición (% en masa)	
Níquel	50.00-55.00
Cromo	17.00-21.00
Hierro	Hasta completar 100%
Niobio	4.75-5.50
Molibdeno	2.80-3.30
Titanio	0.65-1.15
Aluminio	0.20-0.80
Cobalto	1.00 máx.
Carbono	0.08 máx.
Manganeso	0.35 máx.
Silicio	0.35 máx.
Fósforo	0.015 máx.
Azufre	0.015 máx.
Boro	0.006 máx.
Cobre	0.30 máx.

Tabla 2. Propiedades de Inconel 718l [3]

INCONEL 718	
Conductividad térmica a 293 K - (W/m·K)	12
Calor específico (J/Kg·K)	435
Coefficiente de expansión térmica (K ⁻¹)	1.3 x 10 ⁻⁵
Coef. de transmisión de calor por convección (W/m ² ·K)	0.08
Densidad (kg/m ³)	8200
Coefficiente de Poisson	0.3
Módulo de elasticidad (GPa)	217

2.1.2. Aplicaciones en la industria

Inconel 718 fue desarrollado principalmente para la industria aeronáutica, para los motores de los aviones. Fue, posteriormente, cuando se empleó el material para otro tipo de aplicaciones en las que aparecen problemas relevantes relacionados con la corrosión, fluencia, fatiga, etc. Este tipo de aplicaciones se dan en distintos ámbitos, entre los que destacan:

- Industrias: aeroespacial y nuclear
- Procesos químicos y equipos de control de polución
- Tanques de almacenamiento criogénico
- Industria del petróleo: válvulas, tornillería, resortes, mandriles, y ganchos para tubos

Procesos químicos

En algunos procesos en los que surgen problemas de corrosión se utiliza *Inconel* por su gran resistencia a la misma; por ejemplo, en una junta entre dos tuberías en un reactor de coque.

Industria aeroespacial

Como *Inconel* es un material ideal para aplicaciones a altas temperaturas, donde aparecen fenómenos de fluencia y se necesita elevada resistencia a la corrosión y al calor, está muy presente en los motores de aviación, puesto que cuanto mayor sea la temperatura de la combustión, mayor eficiencia energética tendrá el motor. En particular se emplea en los álabes y la carcasa del compresor de altas presiones y en los álabes de la turbina..

También es utilizado en cohetes gracias a que proporciona *dureza* a bajas temperaturas.

Yacimientos petrolíferos

Los primeros usos de la aleación fueron cierres, válvulas, vástagos y resortes en la maquinaria de extracción de los yacimientos de gas y petróleo.

Posteriormente se empleó en las herramientas de perforación y en el equipo de terminación de cabezal en pozos.

2.2. Mecanizado

2.2.1. Introducción al mecanizado

En la fabricación por *mecanizado*, también conocida como fabricación por *arranque de viruta*, las dimensiones requeridas de las piezas a fabricar se obtienen por medios mecánicos y con herramientas de filo, separando partes del material.

Se diferencian dos procesos de fabricación por mecanizado en función del filo de la herramienta:

- procesos de arranque con filos geoméricamente determinados (la herramienta tiene formas geométricas determinadas)
- procesos de arranque con filos no determinados (se arrancan finas virutas con granos abrasivos sin forma geométrica determinada. Ambos procesos se ven en la *figura 1*.

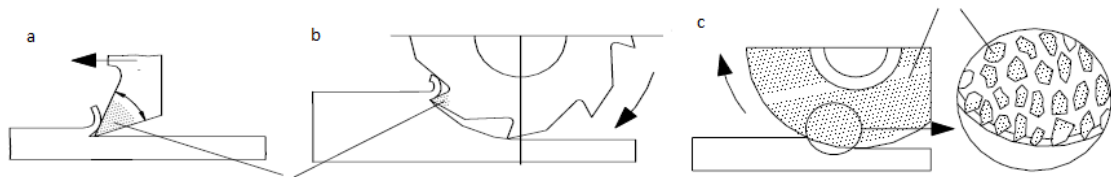


Figura 1. Arranque de viruta con filos determinados (a y b) y con filos no determinados (c).

Además, en función del tipo de mecanizado, se distinguen el *corte ortogonal* (*figura 2*) y el *corte oblicuo*. En el *corte ortogonal*, el filo de la herramienta es perpendicular al desplazamiento relativo herramienta-pieza, mientras que en el *corte oblicuo* el ángulo no es recto. El *corte ortogonal* es el empleado en las simulaciones del presente trabajo.

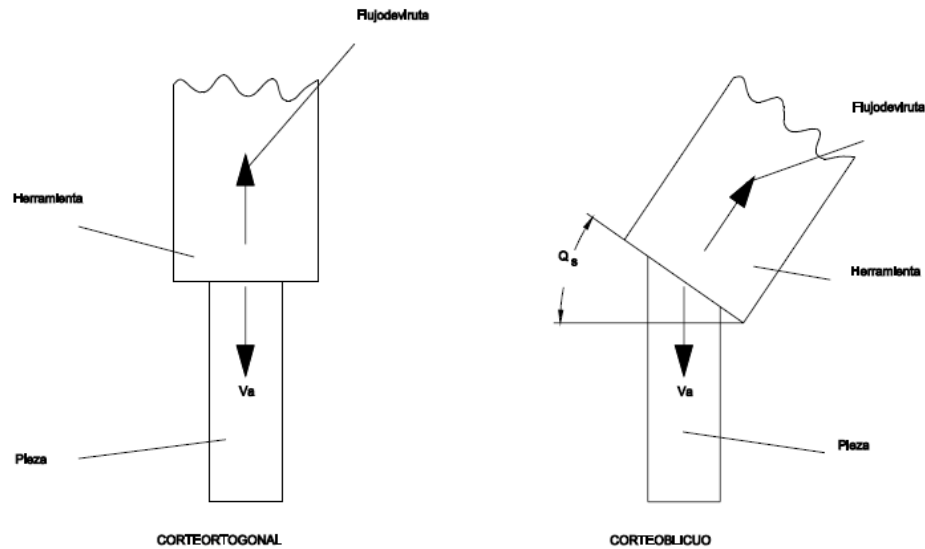


Figura 2. Corte ortogonal y corte oblicuo.

2.2.2. Fundamentos del arranque de viruta

En la industria, las máquinas encargadas de realizar el mecanizado se denominan, de forma genérica, máquinas-herramientas, y se diferencian tres elementos que intervienen en el proceso: *Máquina-herramienta*, *herramientas de corte* y *elementos de sujeción*.

2.2.3. Movimientos en el arranque de viruta

Es necesario que se produzcan movimientos relativos entre la herramienta y la pieza, de forma que se genere una interacción entre ambas y se produzca el arranque de viruta. Se distinguen cuatro tipos de movimientos:

- Movimiento de corte: es el movimiento que, sin movimiento de avance, arranca viruta durante una revolución (si es movimiento circular) o durante una carrera (si es movimiento rectilíneo). En este proyecto se utiliza movimiento rectilíneo.
- Movimiento de avance: es el movimiento que, combinado con el movimiento de corte, hace factible el arranque continuo de viruta.
- Movimiento de penetración: establece la profundidad del corte y, con ello, el espesor de la viruta arrancada.
- Movimiento de aproximación: es el único que no conlleva arranque de material, y abarca todos los movimientos que realiza la herramienta antes de entrar en contacto con la pieza.

2.2.4. Magnitudes de corte

Las magnitudes de corte o parámetros de corte son los valores que hay que ajustar en el proceso de mecanizado para que se realice de forma óptima.

- Velocidad de corte: velocidad lineal relativa de la herramienta respecto de la herramienta en dirección y sentido del movimiento de corte. La velocidad de corte óptima es un valor experimental que depende de múltiples factores (material de la pieza, material de la herramienta, sección de la viruta, refrigeración, etc.). A partir de la velocidad de corte se obtienen las revoluciones por minuto (rpm) a las que debe girar la pieza o la herramienta:

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}$$

Siendo:

V_c = velocidad de corte, en mm/min

d = diámetro de la pieza o de la herramienta, en mm

n = revoluciones de la pieza o de la herramienta, en rpm

- Avance: es el camino recorrido por la herramienta en cada revolución o carrera.

$$v_a = a \cdot n$$

Donde:

V_a = velocidad de avance, en mm/min

a = avance, en mm

n = velocidad de giro de la herramienta o de la pieza, en rpm

- Profundidad de corte: es la distancia que penetra la herramienta en la pieza. Con ella se conoce la sección de viruta:

$$S = a \cdot p$$

Siendo:

S = sección de viruta, en mm^2

a = avance, en mm

p = profundidad de corte o de pasada, en mm

2.2.5. Morfología y formación de la viruta

La viruta se separa del material por la combinación de los siguientes procesos:

- Cortadura o recalcado: el material es desplazado por el filo, que penetra en él.
- Corte: el esfuerzo cortante es mayor que la resistencia al corte del material por lo que se corta una parte de la viruta.
- Fluencia o salida de viruta: dependiendo del material se produce desprendimiento de la viruta o la unión de unas con otras, formando una viruta continua.

A partir de estos procesos, se distinguen tres tipos de viruta (*figura 3*):

- Viruta discontinua: típica de materiales frágiles y duros. Según se produce la viruta, se va desprendiendo, por lo que su evacuación es sencilla. También aparece con velocidades de corte bajas.
- Viruta continua: la viruta se comprime fuertemente al aproximarse al filo y se produce una viruta continua cuya cara de contacto con la cuchilla es lisa y brillante. Al generarse, la viruta forma espirales y molesta en el proceso de arranque de viruta, por lo que se intenta evitar. Aparece a velocidades de corte muy altas y pequeños avances.
- Viruta semicontinua: materiales tenaces y velocidades de corte reducidas. Es una combinación de los casos anteriores.

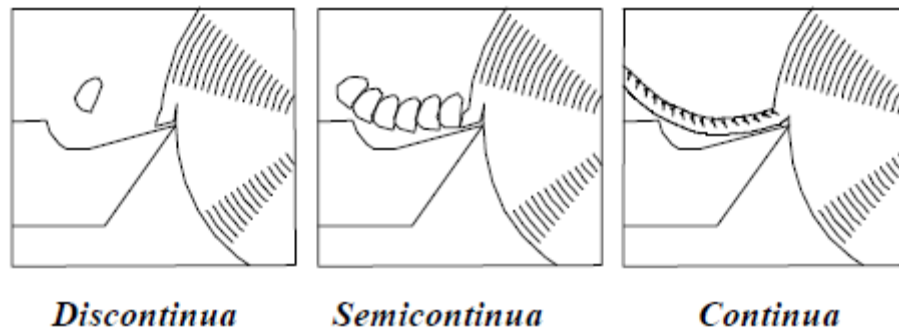


Figura 3. Tipos de viruta

En las virutas semicontinuas se pueden diferenciar distintas partes, como muestra la *figura 4*, de los cuales se obtienen unos parámetros de medición, a partir de los cuáles se obtienen otros parámetros geométricos como el espesor de la viruta. Estos parámetros son: la altura de la cresta (h_c), la altura del valle (h_v), la sección de la viruta (S), el ancho de la viruta (b) y el ángulo de deslizamiento (ϕ).

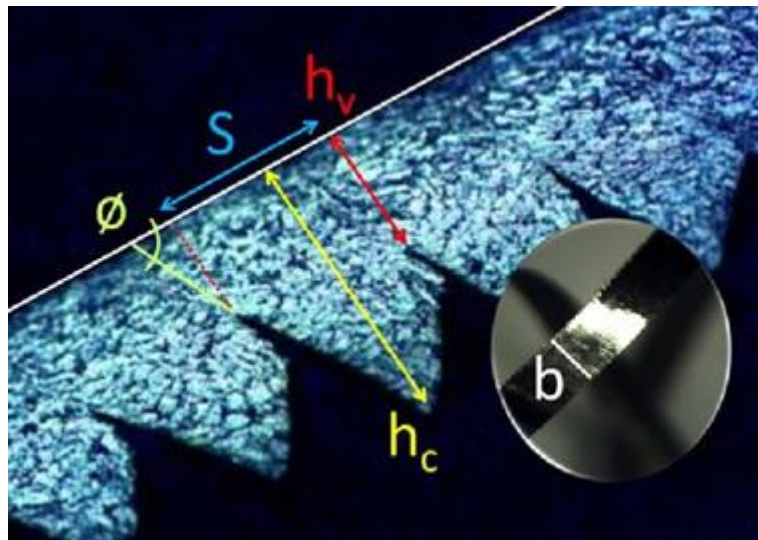


Figura 4. Parámetros de medición de viruta.

2.2.6. Corte ortogonal

El corte ortogonal se caracteriza porque el filo de la herramienta es perpendicular a la velocidad relativa herramienta-pieza. El flujo de viruta se da en el mismo plano que dicha velocidad (ver *figuras 2 y 5*).

2.2.6.1. Magnitudes en el corte ortogonal

Ángulos

Los elementos importantes de la herramienta en el corte ortogonal son el *filo*, la *superficie de ataque* (que es la cara de la herramienta sobre la que desliza el material desprendido) y la *superficie de incidencia* (la cara de la herramienta que queda frente a la superficie trabajada). La posición de estas superficies queda definida por los siguientes ángulos (figura 5):

- Ángulo de incidencia: si es muy pequeño, el contacto con la pieza aumenta y se produce un desgaste rápido en la herramienta. Si por el contrario es demasiado grande, se debilita el filo.
- Ángulo de desprendimiento: un ángulo de desprendimiento grande provoca que la herramienta penetre y corte bien, dando un buen acabado superficial, pero debilitando el filo. Un ángulo de desprendimiento pequeño favorece la resistencia de la herramienta, pero la energía consumida y el calentamiento de la herramienta aumentan.
- Ángulo de filo o herramienta: formado por las superficies de incidencia y desprendimiento.

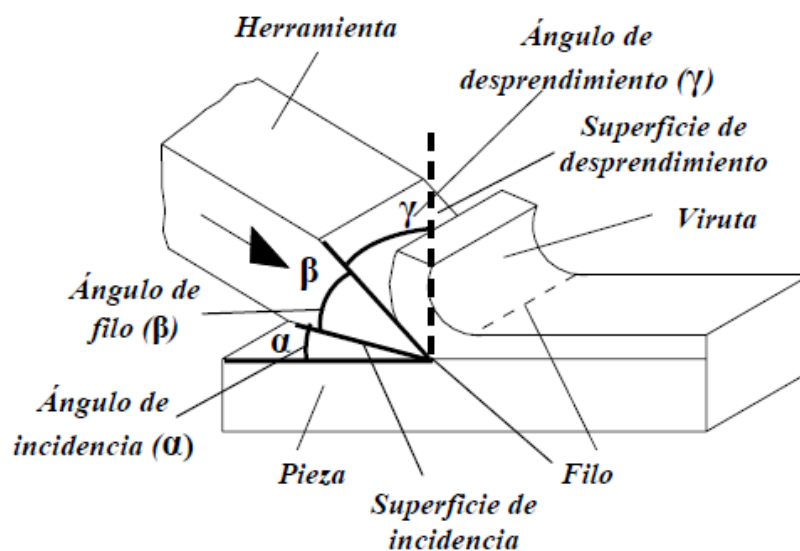


Figura 5. Ángulos en el corte ortogonal.

Velocidades

- Velocidad de corte (V_c): velocidad lineal relativa de la herramienta respecto de la herramienta en dirección y sentido del movimiento de corte.
- Velocidad de deformación o cizallamiento (V_s): velocidad con la que se rompe la viruta.
- Velocidad de salida de viruta (V_v): velocidad a la que sale la viruta.

En la *figura 6* se observa un esquema en el que las velocidades son representadas mediante vectores.

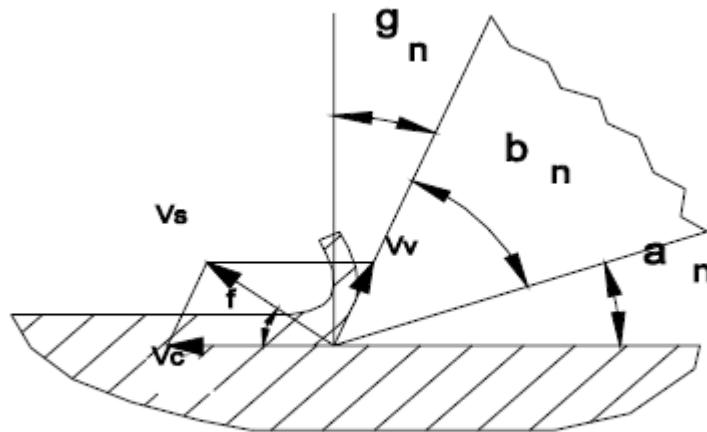


Figura 6. Velocidad de corte (V_c), de deformación (V_s) y de salida de viruta (V_v).

Fuerzas

Las fuerzas que aparecen en el corte ortogonal están relacionadas con las sollicitaciones mecánicas del material y de la herramienta, como la potencia necesaria en la máquina para poder realizar el proceso.

Las fuerzas de reacción del material mecanizado no actúan en el filo de la herramienta, sino en una zona, más alejada de él, que se hace mayor cuanto más pequeño sea el ángulo de desprendimiento.

Se distinguen tres fuerzas (*figura 7*) en el corte ortogonal:

- Fuerza de corte: permite conocer la potencia necesaria en la máquina.
- Fuerza de deslizamiento: se utiliza para calcular las tensiones cortantes en el plano donde la viruta es producida.
- Fuerza de rozamiento: es la fuerza generada por el contacto entre la viruta y la herramienta.

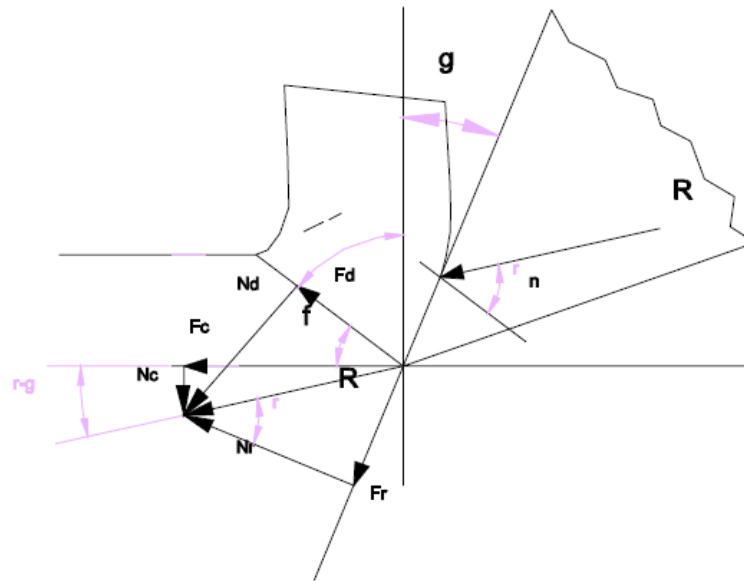


Figura 7. Fuerza de corte (F_c), fuerza de deslizamiento (F_s) y fuerza de rozamiento (F_r) en el corte ortogonal.

2.2.7. Mecanizado en Inconel 718

La superaleación *Inconel 718* es un material de difícil maquinabilidad. La maquinabilidad de un material es una propiedad que permite establecer y comparar la facilidad con que puede ser mecanizado por arranque de viruta.

Las propiedades responsables de la pobre maquinabilidad de *Inconel 718*, así como de las superaleaciones de base Níquel, son:

- la gran resistencia a altas temperaturas, que provoca que gran parte de la resistencia mecánica del material se mantenga durante el mecanizado.
- su resistencia a la tensión y al endurecimiento genera un alto desgaste en la herramienta.

- la presencia de partículas de carburos en su microestructura, causa de un desgaste abrasivo en la herramienta.
- una pobre conductividad térmica, que origina grandes temperaturas en la superficie de desprendimiento de la herramienta.
- la base níquel de estas superaleaciones debido a la afinidad química con los materiales empleados en las herramientas de corte genera en éstas un desgaste por difusión.
- las elevadas fuerzas surgidas durante el proceso de mecanizado, debidas a la gran resistencia del material, pueden generar vibraciones y comprometer la calidad superficial del acabado.

2.3. Método de elementos finitos (FEM)

En este proyecto se ha utilizado como software **ABAQUS** fundamentado en el *método de elementos finitos* para la resolución de problemas como los aquí tratados. **ABAQUS** está compuesto por varios programas, siendo **ABAQUS/Explicit** el utilizado para el presente proyecto, ya que permite realizar un *análisis dinámico explícito* que, computacionalmente, es más eficiente que un análisis dinámico implícito para modelos grandes con respuesta dinámica relativamente corta. Este tipo de análisis es usado en problemas cuasi-estáticos con condiciones de contacto complicadas.

El *método de elementos finitos*, simplificado como FEM (del inglés *finite element method*) permite obtener una solución numérica aproximada sobre una estructura compleja (medio continuo) dividiéndola en un gran número de *elementos* de mayor sencillez denominados elementos finitos. Estos elementos están conectados entre sí por unos puntos representativos denominados *nodos*. El conjunto formado por elementos y nodos se denomina *mall*.

Los fenómenos ingenieriles se rigen por unas ecuaciones constitutivas del modelo que se quiere analizar y unas condiciones de contorno determinadas, las cuales definen un sistema de ecuaciones complejo que debe resolverse para calcular la solución. Mediante el método de elementos finitos, el sistema se divide en elementos simples, se obtienen las ecuaciones de cada elemento que se resuelve de forma sencilla y se aproxima la solución global.

Ventajas del FEM

- Utilizado en cálculos de problemas de geometría compleja.
- Solución para un amplio cartel de problemas de ingeniería (mecánica de sólidos, dinámica, transferencia de calor, fluidos).
- Resuelve problemas con sistemas de carga complejos.

Desventajas del FEM

- La solución es aproximada.
- Conlleva errores al formular (geometría simplificada, elección de la complejidad del elemento), al calcular y otros creados por el usuario (selección del elemento, distorsión del elemento, unidades inconsistentes, etc.).

El procedimiento llevado a cabo por los programas que utilizan el método de elementos finitos se divide en tres fases:

- **Pre-proceso:** es el proceso de configuración llevado a cabo por el usuario que crea el modelo de elementos finitos. Se selecciona el tipo de análisis (estructural, dinámico, térmico...), la geometría del elemento (2D ó 3D), se definen las propiedades del material, las condiciones de contorno y las cargas y se establece la malla, la cual define el tamaño de los elementos y la situación de los nodos.
- **Proceso de cálculo:** realizado por el ordenador, resuelve las ecuaciones constitutivas y de contorno, con N ecuaciones y N incógnitas, en función del número de nodos establecidos en el pre-proceso.
- **Pos-proceso:** el usuario visualiza los resultados y analiza los parámetros objetivo (desplazamiento, tensiones, esfuerzos, temperaturas...)

En la *figura 8* se muestran algunos ejemplos de aplicación del Método de Elementos Finitos en **ABAQUS**.

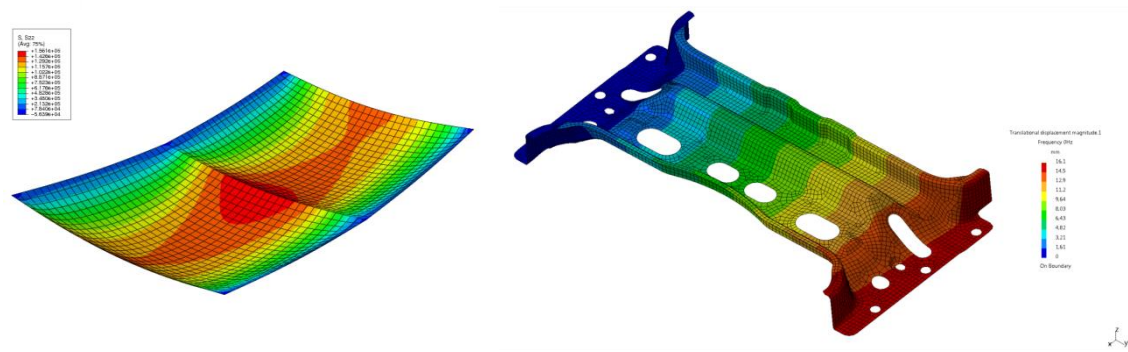


Figura 8. Ejemplos de aplicación del Método de Elementos Finitos con **ABAQUS** [4] [5].

Apartado III

3. Modelo numérico

En el presente apartado se explica el modelo numérico utilizado para la simulación a través del método de elementos finitos.

También se explican las ecuaciones por las cuales se rige el modelo numérico y los valores característicos para este material.

Por último, se mencionan los parámetros analizados en el trabajo.

3.1. Características del modelo

El modelo ha sido desarrollado para un proceso de corte ortogonal de *Inconel 718*. Se distinguen dos elementos: el material de trabajo, que se describirá en los siguientes apartados, y la herramienta, la cual se supone rígida durante la simulación.

El desarrollo del modelo no forma parte del presente trabajo, pues requiere un largo estudio y trabajo, es por ello que ha sido facilitado de antemano por el tutor, X. Soldani.

A continuación, se muestran las características del modelo numérico empleado:

a) **Mallado del modelo**

El modelo utilizado en el trabajo es un modelo de deformación plana (2D) utilizando el código comercial de *elementos finitos ABAQUS/Explicit*, con formulación Lagrangiana.

En la *figura 9* se muestra un esquema del modelo numérico en el que se diferencian tres zonas del mallado: la zona A, que corresponde a la viruta, de espesor 0,1 mm (el avance de la herramienta); la zona B, una capa intermedia, de espesor 0,004 mm; y la zona C, que es la superficie mecanizada de la pieza, con un espesor de 0,4 mm. La malla de la zona A está caracterizada por un ángulo de inclinación de 45° respecto a la horizontal, cuya elección ha sido realizada para facilitar la formación de viruta segmentada durante el proceso de mecanizado. Las zonas B y C tienen un mallado paralelo a la horizontal y a la vertical. Esto se aprecia en la *figura 10*.

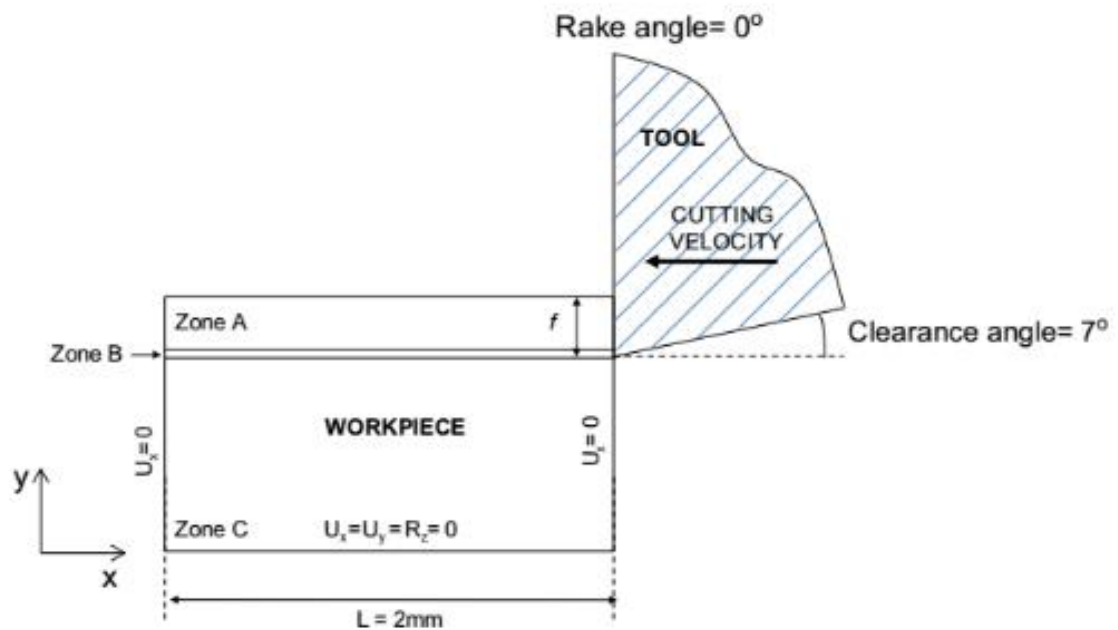


Figura 9. Esquema del modelo numérico y condiciones de contorno.

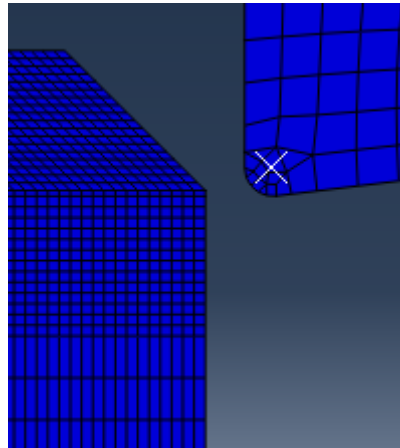


Figura 10. Detalle del mallado del modelo numérico.

Los elementos utilizados en el mallado del modelo son **CPE4RT** que indica:

- Elemento cuadrado (C)
- Condiciones de tensión plana (PE)
- Cuatro nodos por elemento (4)
- Integración reducida (R), para reducir el número de puntos de cálculo aumentando la eficiencia computacional del modelo
- Temperatura utilizada como variable (T)

En estudios previos de X. Soldani, se ha estudiado la convergencia de la malla, es decir, el tamaño de malla a partir del cual los resultados numéricos varían muy poco.

El tamaño del elemento fijado para este proyecto es de 8 μm .

b) Geometría y ángulos de la herramienta

En la *figura 9* se aprecia la geometría del corte y los ángulos de la herramienta. En la *tabla 3* se encuentra un resumen de cuales son estos ángulos y la geometría.

Tabla 3. Geometría del modelo.

Avance (mm)	Profundidad (mm)	Ángulo de incidencia (°)	Ángulo de desprendimiento (°)	Longitud (mm)
0.1	1	7	0	2

c) Parámetros de corte y condiciones de contorno

- Condiciones de contorno: En la *figura 9* se pueden ver las condiciones de contorno aplicadas al modelo. La base de la pieza está encastrada, por lo que se han restringido los movimientos horizontales y verticales, y las reacciones del eje Z son cero. En los laterales, el desplazamiento horizontal es cero. La parte superior, que corresponde con la parte de material que formará la viruta, no tiene restricciones. La herramienta, como se ha comentado anteriormente, es un elemento rígido y no sufre deformación alguna.
- Propiedades del material y de la herramienta: En la *tabla 4* se muestran las propiedades tanto del material mecanizado como de la herramienta, que se mantienen fijas en todas las simulaciones realizadas.

En el material se diferencian tres partes: base, viruta, capa intermedia.

Tabla 4. Propiedades del material y de la herramienta.

Parámetro	Base	Viruta	Capa intermedia	Herramienta
Densidad (Kg/m ³)	8200	8200	8200	12700
Energía de daño (J)	27000	45000	10000	-
Módulo de elasticidad (GPa)	217	217	217	500
Coefficiente de Poisson	0.3	0.3	0.3	0.3
Calor específico (J/Kg·K)	435	435	435	234
Coef. expansión térmica (1/K)	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-5}$	-

- Conductividad térmica: Para estudiar la influencia que tiene la conductividad térmica en las fuerzas de corte y la formación de la viruta se han realizado dos tipos de simulación: uno suponiendo conductividad térmica es constante (12 W/m·K); y otro en el que la conductividad térmica del material varía con la temperatura (valores de la *figura 9*).

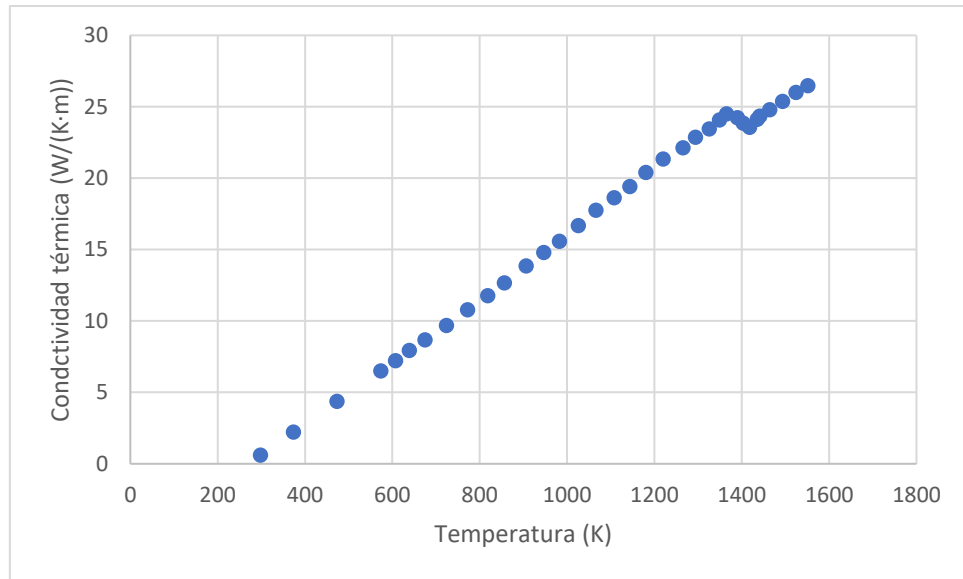


Figura 11. Conductividad térmica en función de la temperatura para Inconel 718 [6].

- Velocidad de corte: para ver cómo afecta a las fuerzas de corte y a la formación de la viruta, se han realizado las simulaciones a distintas velocidades de corte: 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 14 y 15 m/s.
- Tiempo de corte: el tiempo de corte, depende de la velocidad de corte y la longitud de mecanizado. Los datos proporcionados por la simulación son válidos alcanzada la mitad de la longitud de la pieza, puesto que el proceso ya es estacionario o cíclico. En cada simulación, el tiempo de corte será:

$$t_c(s) = \frac{0,001}{v_c}$$

- Fricción: El valor utilizado para la fricción entre la herramienta y el material, permanece constante en todas las simulaciones y tiene un valor de $\mu=0,5$.

3.2. Ecuaciones constitutivas del modelo

Para la realización del cálculo computerizado con el programa **ABAQUS**, es necesario definir un modelo constitutivo para elementos finitos de forma que haya una mejor descripción del comportamiento del material.

Las ecuaciones constitutivas del modelo empleado están definidas por las *ecuaciones de Johnson-Cook*, que son el estándar para analizar la deformación de metales a alta velocidad.

3.2.1. Ley de comportamiento del material

La ley de comportamiento del material de Johnson-Cook viene definida por la siguiente expresión:

$$\sigma_Y = (A + B\varepsilon_p^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)^m\right)$$

Donde:

- σ_Y es el límite elástico.
- ε_p^n es la deformación plástica acumulada.
- ε_p es la deformación plástica equivalente.
- A, B, C, ε_0 , n y m son constantes del material
- T_m es la temperatura de fusión del material.
- T_0 es la temperatura ambiente (25°C).

Los valores que toma la ecuación para *Inconel 718* [3] aparecen en la *tabla 5*.

Tabla 5. Variables de la ley de comportamiento de Johnson-Cook para Inconel 718.

A (MPa)	B(MPa)	C	n	m	ε_0	T_m (K)
980	1370	0.02	0.164	1.03	1	1573

3.2.2. Ley de daño

La rotura de un material en eventos de impacto es un proceso complejo ya que de manera simultánea en el proceso de mecanizado tienen lugar grandes deformaciones, altas velocidades de deformación, gradientes térmicos y grandes tensiones. Es por ello que se necesita un modelo que tenga en cuenta todos esos efectos.

Johnson y Cook propusieron un criterio en el que el daño de los materiales se interpreta como la degradación de la resistencia de los mismos debido a efectos de carga, térmicos o químicos.

La ley de daño de Johnson-Cook, para *Inconel 718* queda definida por la siguiente expresión:

$$\varepsilon^{-f} = [D_1 + D_2 \cdot \exp(D_3 \cdot \bar{\sigma})][1 + D_4 \cdot \ln(\dot{\varepsilon}_{pl})][1 + D_5 \cdot (\frac{T - T_0}{T_m - T})]$$

Siendo:

- ε^{-f} la deformación de fallo equivalente
- $\bar{\sigma}$ la tensión equivalente
- $\dot{\varepsilon}_{pl}$ la deformación plástica equivalente
- D_1, D_2, D_3, D_4 y D_5 parámetros propios del material
- T_m la temperatura de fusión del material
- T_0 la temperatura ambiente (25°C)

Las variables para el material son las mostradas en la *tabla 6*.

Tabla 6. Variables de la ley de daño de Johnson-Cook para Inconel 718 [7].

D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
0.04	0.75	-1.45	0.04	0.89

3.3. Parámetros estudiados y proceso de simulación

El proceso más largo y de mayor peso del trabajo han sido las simulaciones, puesto que requiere un tiempo de cálculo que varía entre 30 minutos y 4 horas. De estas simulaciones se han obtenido los resultados del estudio.

En total se han realizado 17 simulaciones divididas en dos grupos: 9 simulaciones en las que se ha supuesto que la conductividad térmica varía en función de la temperatura y 8 simulaciones con la conductividad térmica constante.

Los parámetros estudiados en todas las simulaciones son:

- morfología de la viruta generada por el corte
- gráfica de las fuerzas de corte en función del tiempo
- gráfica de las fuerzas de avance en función del tiempo
- frecuencia de segmentación de la viruta

Apartado IV

4. Datos experimentales

En el presente apartado se recopila la información de los datos experimentales con los cuales se comparan y validan las simulaciones en el siguiente apartado.

4.1. Presiones experimentales de corte y de avance

La *figura 12* y la *figura 13* muestran los datos experimentales recopilados de distintos autores. En ellas se ven las presiones específicas de corte y de avance en función de la velocidad de corte, con las cuales serán comparadas las simulaciones objeto del proyecto.

Los autores de los ensayos experimentales son *Devillez et al.* [8][9][10], *Fang and Wu* [11], *Kose et al.* [12] y *Zenchao et al.* [13].

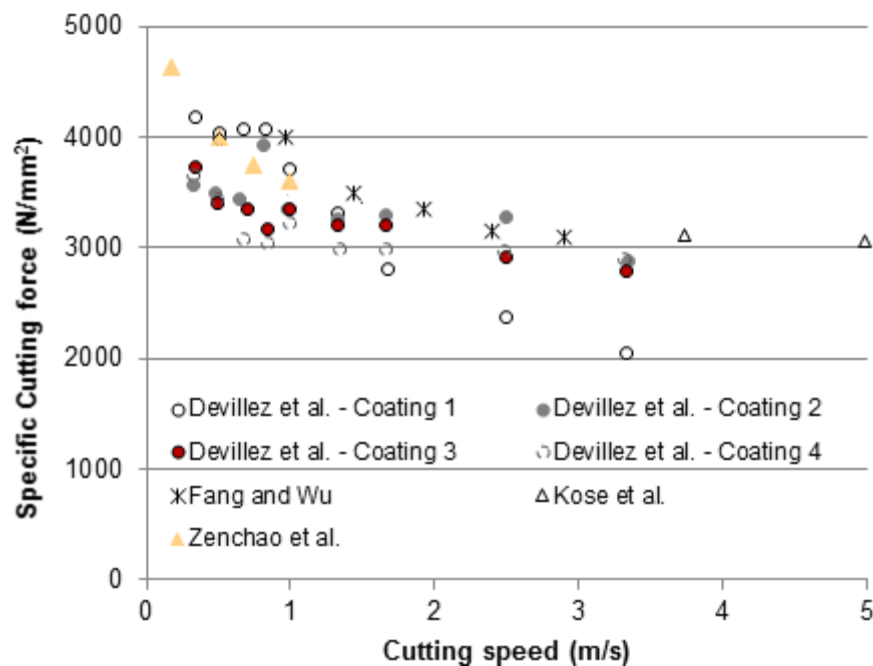


Figura 12. Presiones de corte experimentales.

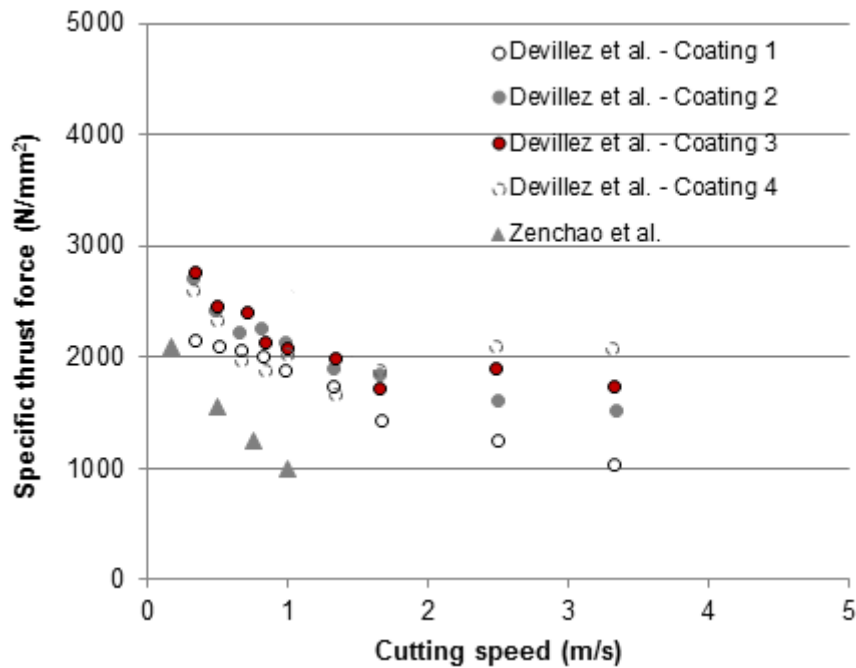


Figura 13. Presiones de avance experimentales.

En ambas figuras se puede apreciar que las fuerzas generadas en el corte tienden a disminuir conforme se aumenta la velocidad. La variación de los valores se debe a que cada ensayo está hecho en unas condiciones ambientales determinadas, distintas condiciones de corte (ángulo de desprendimiento, avance, etc.), herramientas diferentes y los tratamientos superficiales de cada mecanizado no es el mismo.

A continuación, se explican las motivaciones de cada autor para realizar el ensayo experimental.

Estudios de Devillez et al.

La motivación de los autores en el ensayo experimental [8] es mejorar la productividad y la calidad de las piezas mecanizadas en la industria, centrándose en *Inconel 718*. Buscan disminuir el desgaste de la herramienta de corte y, con ello, aumentar su vida útil.

Estos ensayos experimentales son realizados con distintos tipos de recubrimientos de la herramienta, denominados “coating” en las *figuras 12 y 13*. Las velocidades varían entre 20 y 200 m/min.

A continuación, se explica en qué consiste cada recubrimiento:

- Coating 1: TiAlN (nitruro de titanio aluminio) nanoestructurado.

- **Coating 2:** AlTiN (nitruro de aluminio titanio, por un contenido de aluminio mayor del 50%) con morfología glubolítica nanocristalina que mejora el flujo de viruta con una menor fricción, reduciendo las fuerzas de corte.
- **Coating 3:** TiAlN con una fina capa intermedia y la capa superior de carburo de Wolframio-Carbono de baja fricción y dureza intermedia.
- **Coating 4:** TiAlN con la capa superior lubricante formada por deposiciones de pequeñas cantidades de titanio en una matriz MoS₂.

En la *tabla 7* se puede apreciar la variación de la dureza de cada recubrimiento.

Tabla 7. Dureza de los recubrimientos empleados en los ensayos experimentales de Devillez et al. [8].

Recubrimiento	Descripción	Dureza HV 0,05
Coating 1	Nanoestructurado	3300
Coating 2	Nanoestructurado	3000 - 3500
Coating 3	Multicapa	2600
Coating 4	Multicapa	2500

Como conclusión, los autores consideran necesario un recubrimiento en la herramienta para obtener una vida suficiente y una integridad superficial aceptable en la pieza mecanizada.

Estudios de Fang and Wu

Este estudio compara las fuerzas de corte generadas en el mecanizado de *Inconel 718* y de *Ti-6Al-4V* [11]. Utilizan una herramienta recubierta con carburo cementado (KC 8050) con TiC/TiN/TiCN. Las velocidades varían entre los 58 y los 174 m/min.

Las conclusiones obtenidas son, como se ve en la *figura 12*, que, conforme aumenta la velocidad de mecanizado disminuye la fuerza de corte y, de forma más general, concluyen que las fuerzas de corte dependen de las interacciones con el material de trabajo, la geometría de la herramienta y las condiciones de corte.

Estudios de Kose et al.

El propósito de este estudio [12] es encontrar la solución más económica para mecanizar *Inconel 718*, encontrando las mejores condiciones de corte.

La obtención de las fuerzas experimentales de la *figura 12* se ha llevado a cabo con las siguientes condiciones de corte: herramienta reforzada con injertos cerámicos ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiC}_w$) y velocidades entre 225 y 500 m/min y un avance entre 0,1 y 0,15 mm/rev.

La conclusión del estudio es que, en términos de optimización de costes del proceso de mecanizado, la velocidad de corte y el avance tiene que estar entre 225 y 400 m/min y 0,1 y 0,125 mm/rev, respectivamente.

Estudios de Zenchao et al.

Mediante la simulación de un modelo numérico, los autores han obtenido las fuerzas y las temperaturas presentes en el proceso de mecanizado de *Inconel 718* [13].

Las condiciones de corte para las cuales se han obtenido las presiones de corte de las *figuras 12 y 13* son: herramienta de carburo (WC-Co) y velocidades entre 20 y 60 m/min.

Las conclusiones obtenidas son que las fuerzas de corte disminuyen conforme la velocidad aumenta, que la temperatura en la zona de corte aumenta con la velocidad y que la mayor temperatura se localiza en la superficie de desprendimiento de la herramienta.

Apartado V

5. Resultados

Se procede, en el presente apartado, a visualizar los resultados obtenidos en las simulaciones y compararlos con los resultados experimentales presentados en el apartado anterior.

También se explica la influencia de la velocidad de corte en las fuerzas generadas en el corte, la morfología de la viruta y la frecuencia de la segmentación.

5.1. Resultados de la simulación

En este apartado se explica la influencia de la velocidad de corte en las fuerzas de avance y de corte y en la morfología de la viruta.

5.1.1. Estudio de las fuerzas de corte y de avance

Los resultados para estudiar cómo influye la velocidad de corte en las fuerzas de corte y de avance se obtenido a través del software **ABAQUS**, tras finalizar la simulación.

Como se ha indicado con anterioridad, se han realizado 17 simulaciones. De todas ellas se han estudiado las fuerzas de corte y de avance. En la *figura 14* se puede observar un ejemplo, generado por **ABAQUS**, de la gráfica de las fuerzas en función del tiempo. Se pueden apreciar dos fuerzas, una mayor que la otra, cada una de un color. En todos los casos, la fuerza de mayor valor será la fuerza de corte y la de menor valor será la fuerza de avance, ambas en Newtons [N].

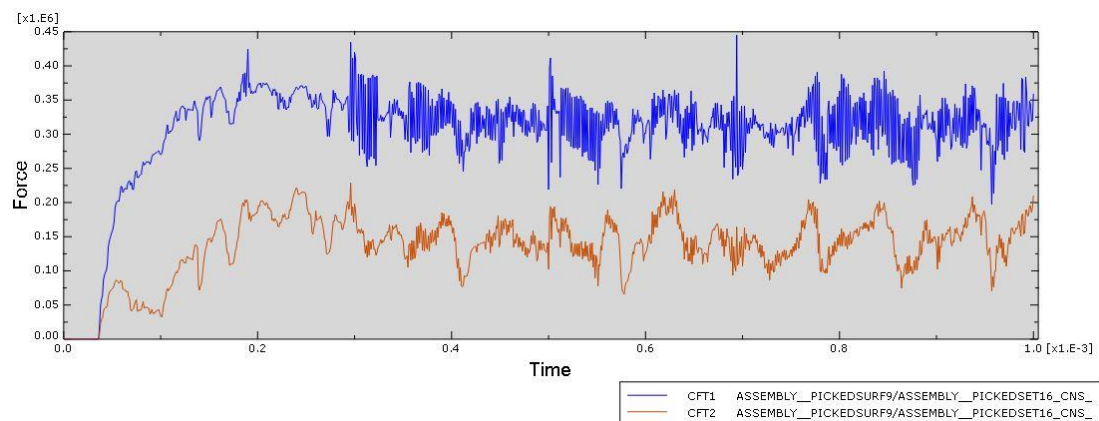


Figura 14. Ejemplo gráfico de fuerzas de corte y de avance.

A continuación, se muestran las gráficas de las fuerzas de corte obtenidas en todas las simulaciones realizadas.

a) Conductividad térmica variable

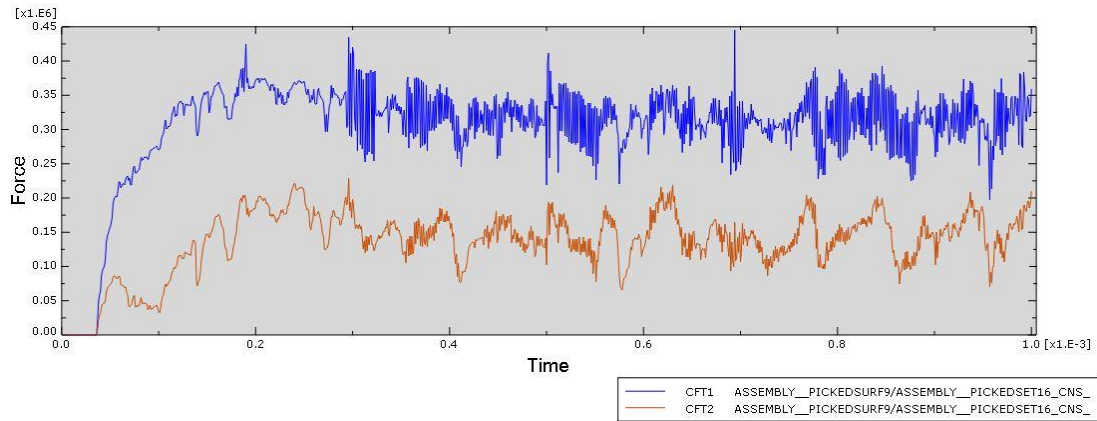


Figura 15. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica en función de la temperatura y $V_{\text{corte}}=1\text{m/s}$.

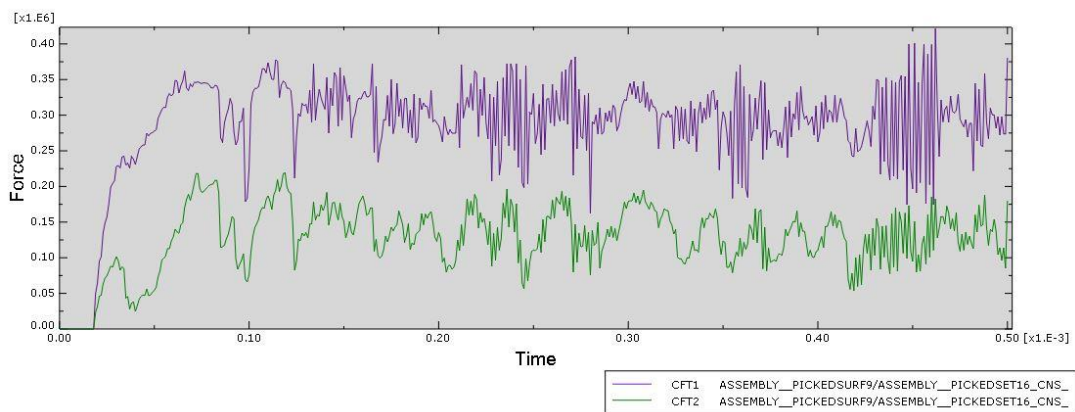


Figura 16. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica en función de la temperatura y $V_{\text{corte}}=2\text{m/s}$.

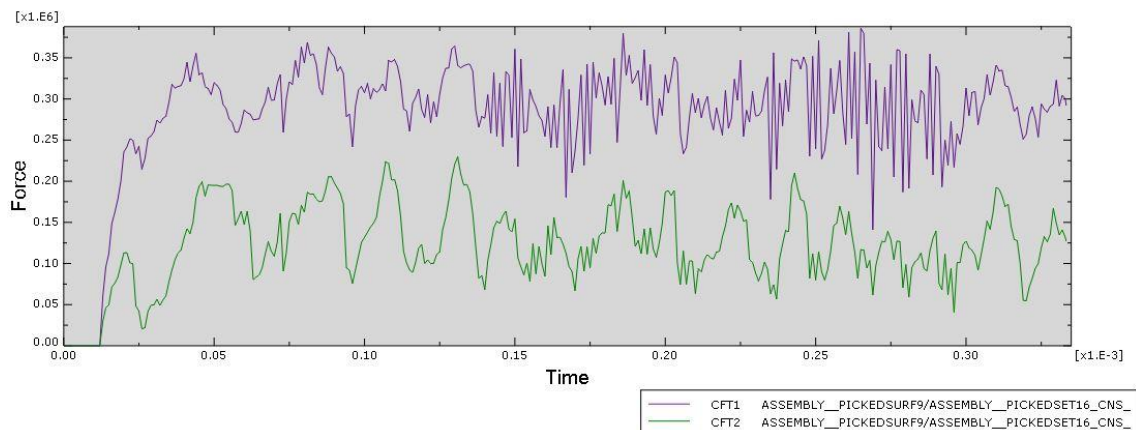


Figura 17. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica en función de la temperatura y $V_{\text{corte}}=3\text{m/s}$.

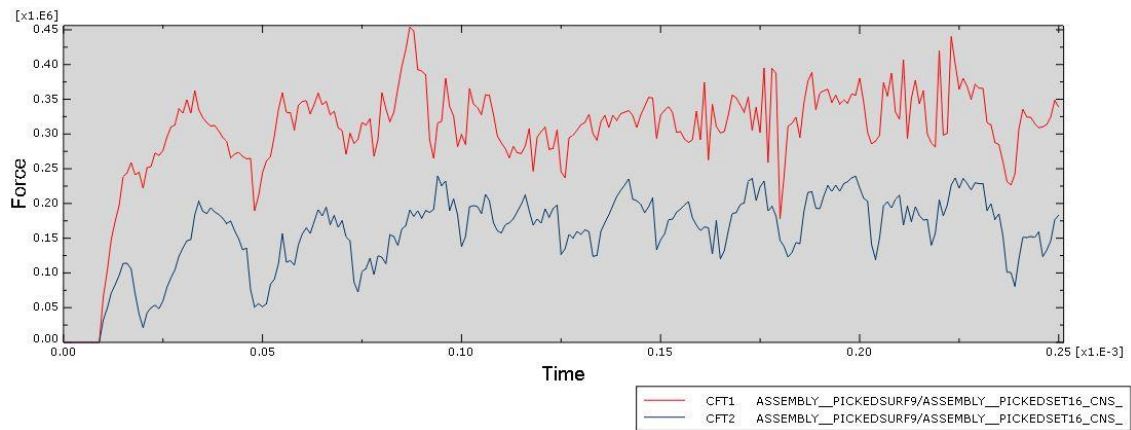


Figura 18. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica en función de la temperatura y $V_{corte}=4m/s$.

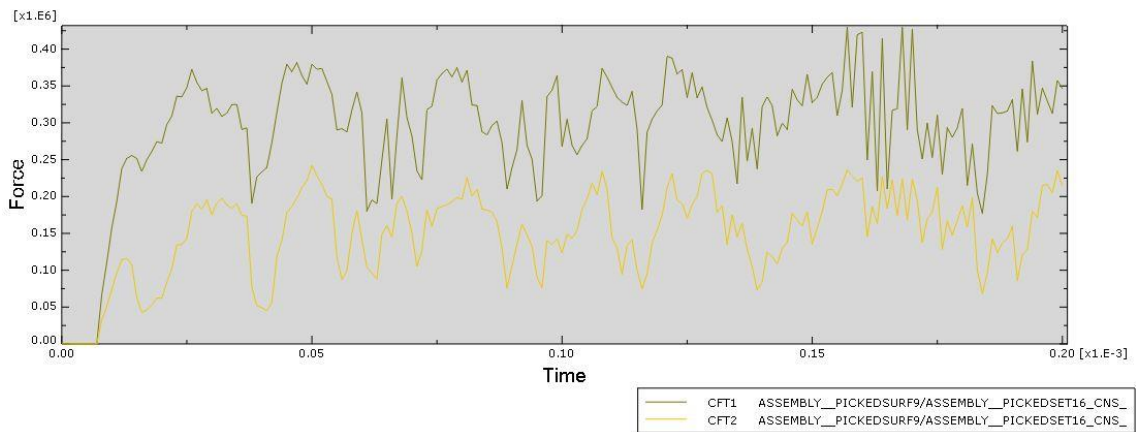


Figura 19. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica en función de la temperatura y $V_{corte}=5m/s$.

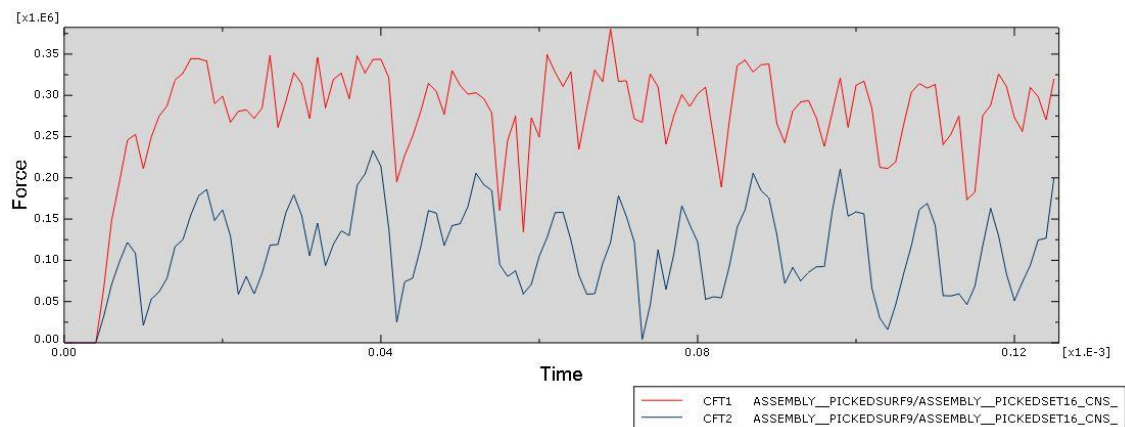


Figura 20. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica en función de la temperatura y $V_{corte}=8m/s$.

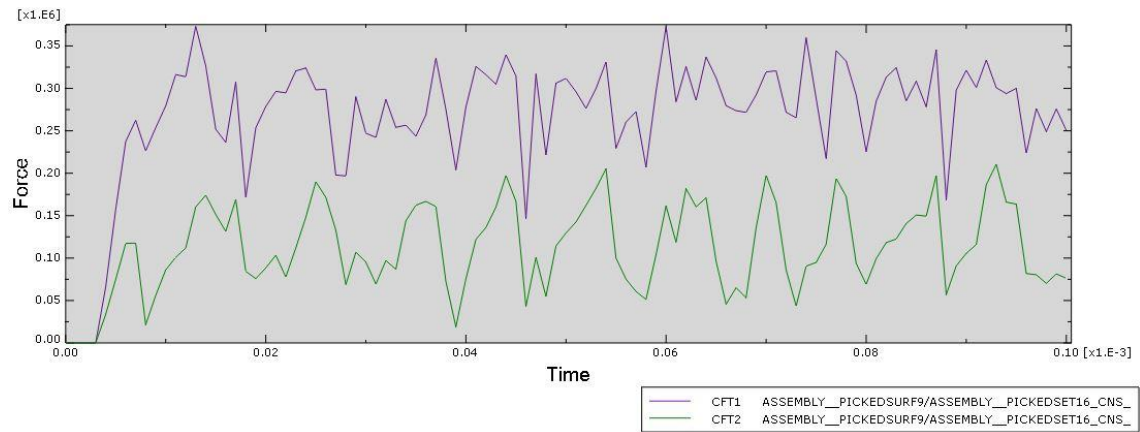


Figura 21. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica en función de la temperatura y $V_{corte}=10m/s$.

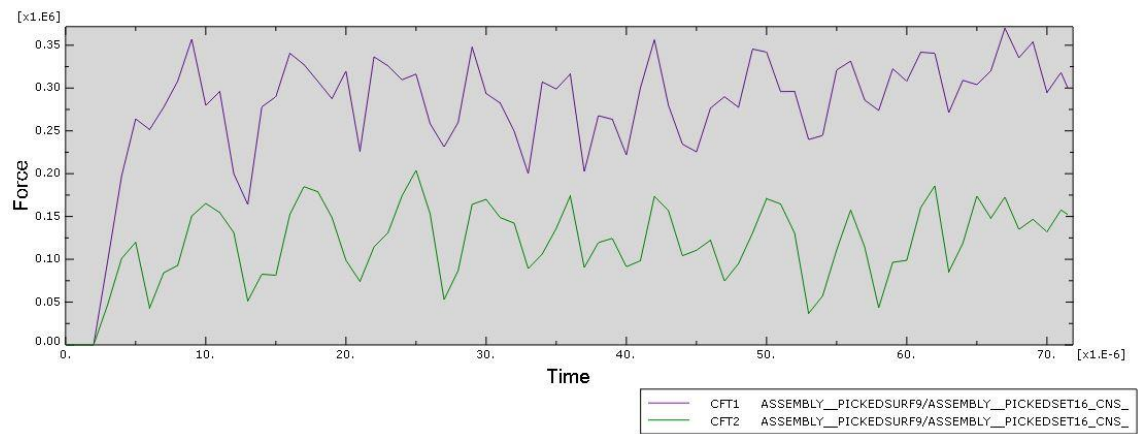


Figura 22. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica en función de la temperatura y $V_{corte}=14m/s$.

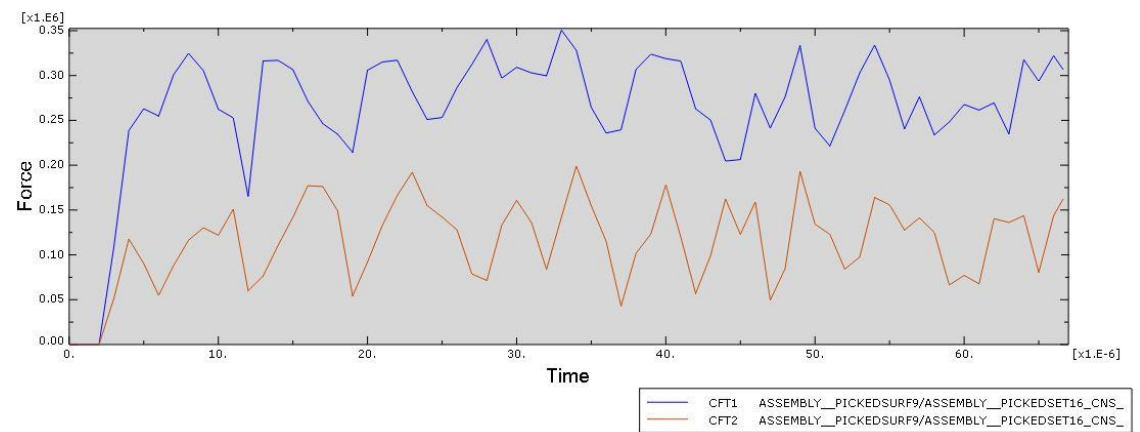


Figura 23. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica en función de la temperatura y $V_{corte}=15m/s$.

b) Conductividad térmica constante

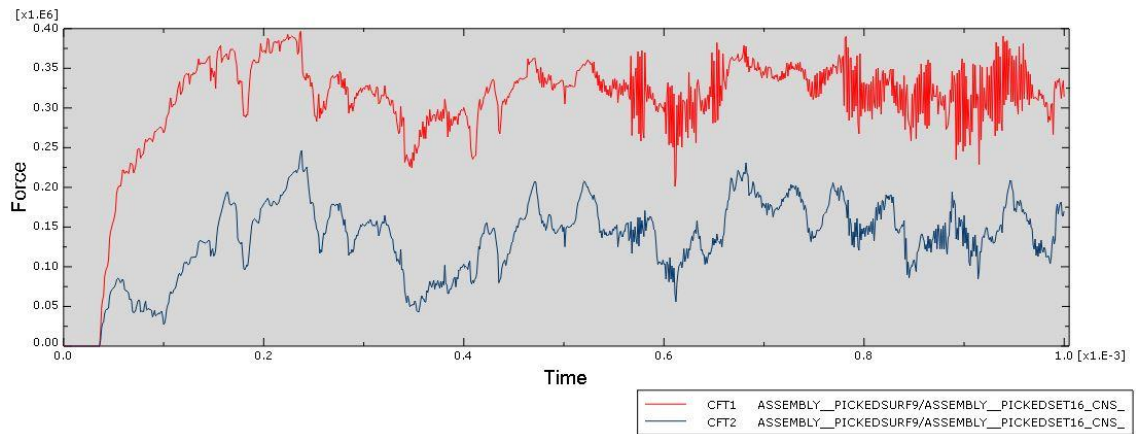


Figura 24. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica constante y $V_{corte}=1m/s$.

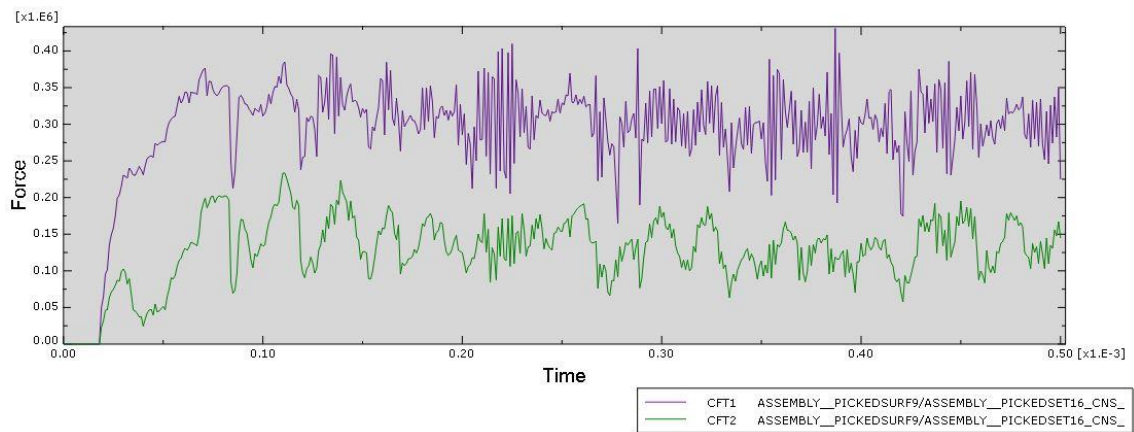


Figura 25. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica constante y $V_{corte}=2m/s$.

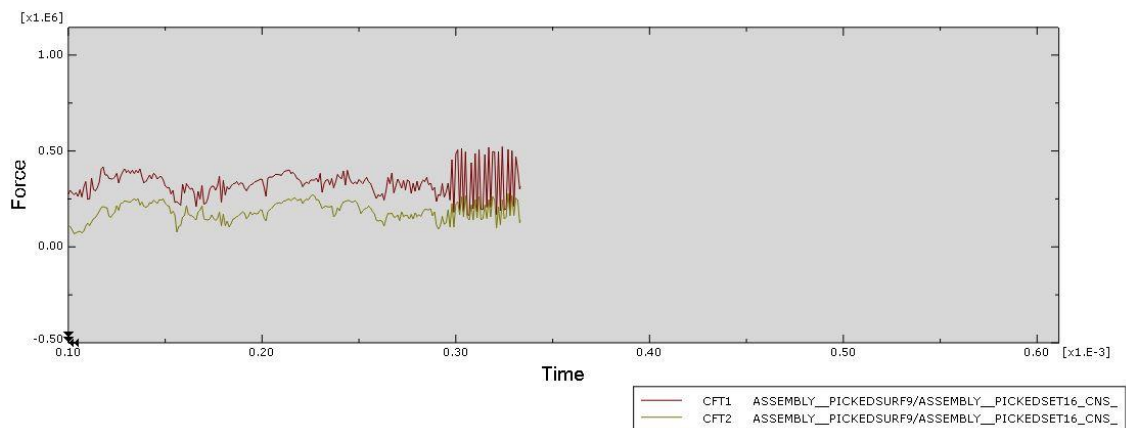


Figura 26.. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica constante y $V_{corte}=3m/s$.

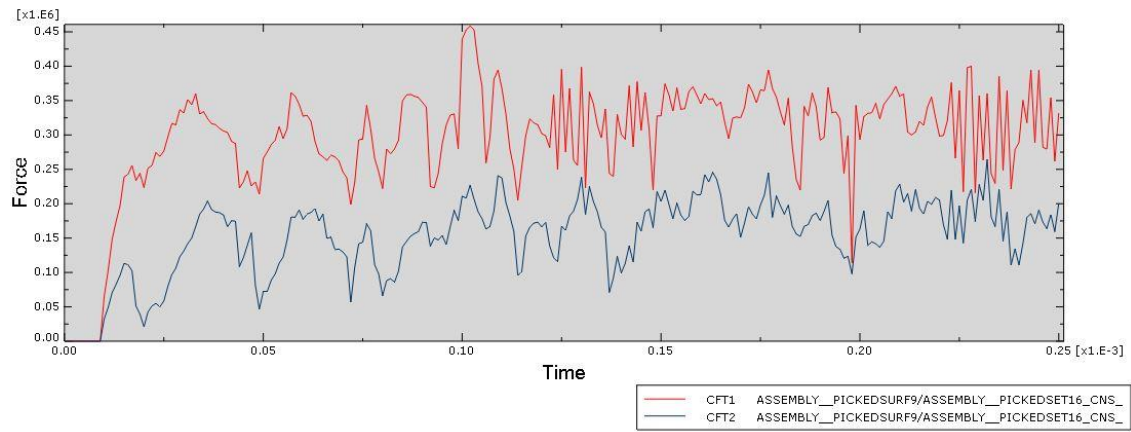


Figura 27.. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica constante y $V_{corte}=4m/s$.

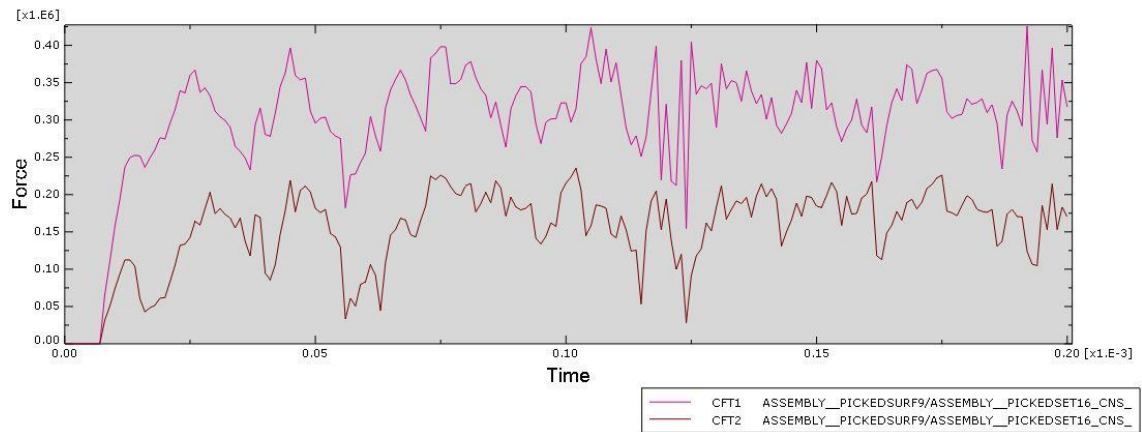


Figura 28. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica constante y $V_{corte}=5m/s$.

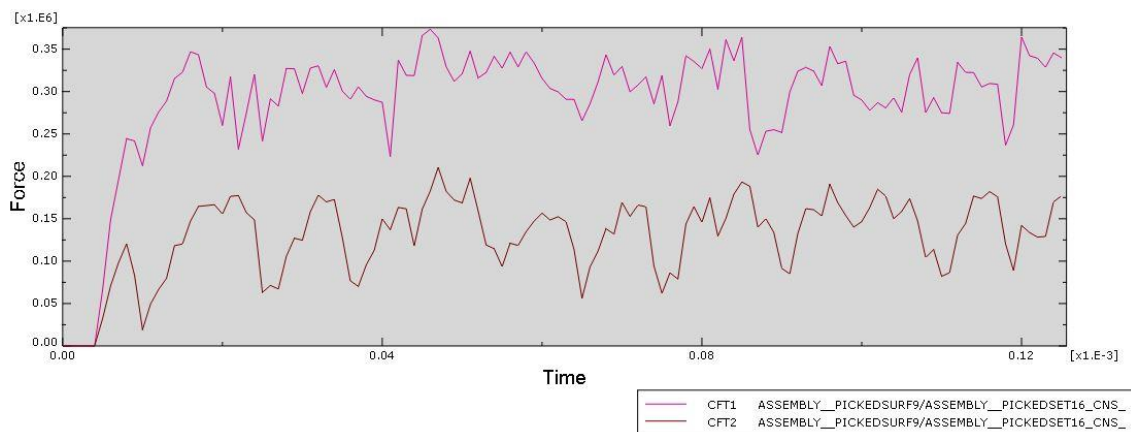


Figura 29. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica constante y $V_{corte}=8m/s$.

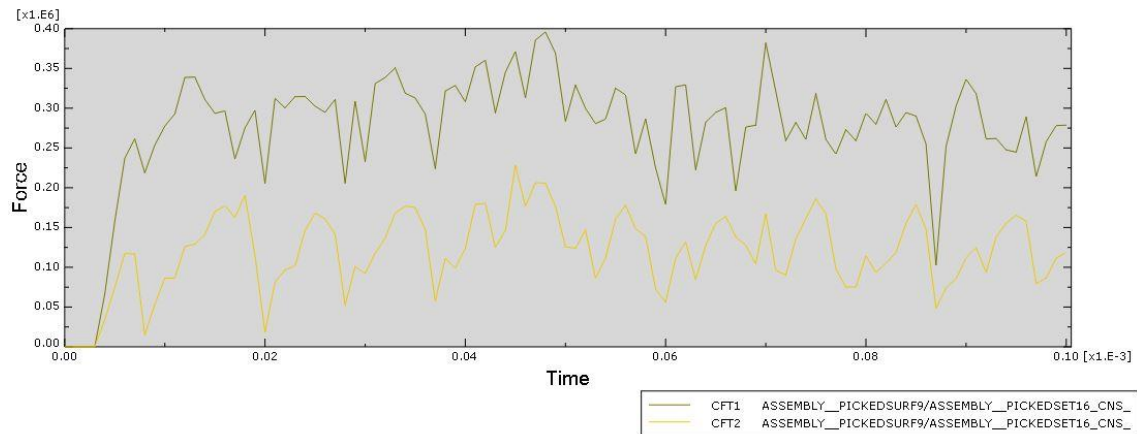


Figura 30. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica constante y $V_{\text{corte}}=10\text{m/s}$.

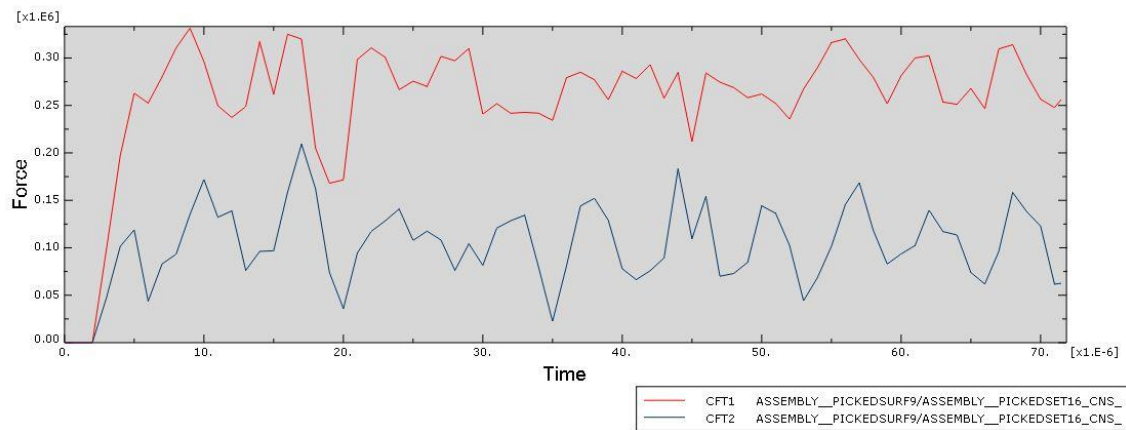


Figura 31. Fuerzas de corte y de avance, conductividad térmica constante y $V_{\text{corte}}=14\text{m/s}$.

Para obtener la influencia de la velocidad en la fuerza de corte y en la fuerza de avance, se va a obtener la fuerza media de cada gráfica. Se han calculado, para cada simulación, dos tipos de fuerza media:

- La *fuerza media total*, utilizando todos los valores de la simulación, desde el inicio hasta el momento en que finaliza la simulación. Estas fuerzas promedio serán llamadas “Fuerza promedio total”.
- La *fuerza media estabilizada*, desde el momento en que se estabiliza la simulación; es decir, descartando los valores iniciales y centrándose solo en los valores en que las fuerzas de la simulación son más estables. Estas fuerzas promedio serán llamadas “Fuerza promedio estable”.

Una vez obtenidas las fuerzas medias, se realizan las *tablas 8 y 9*, y se obtienen las gráficas de las *figuras 32, 33, 34 y 35* con las cuales tenemos valores con que comparar, tanto la influencia de la velocidad de corte en las fuerzas de corte y avance, como la variación entre la fuerza de corte y la fuerza de avance.

Tabla 8. Fuerzas promedio obtenidas en la simulación con la conductividad térmica en función de la temperatura.

Velocidad de corte (m/s)	Fuerza de corte promedio total (N)	Fuerza de corte promedio estable (N)	Fuerza de avance promedio total (N)	Fuerza de avance promedio estable (N)
1	303025,07	315609,18	135896,59	144737,14
2	284712,95	294797,61	127130,08	131487,25
3	281931,06	295550,56	122325,36	127024,55
4	301765,16	321990,21	157055,19	181239,75
5	291621,45	308557,85	149373,11	163910,26
8	272237,05	282690,27	110507,87	112877,18
10	268295,53	289421,61	111881,22	120669,67
14	274845,85	292693,63	118215,76	126178,89
15	263560,66	282057,39	114924,09	123918,59

Tabla 9. Fuerzas promedio obtenidas en la simulación con la conductividad térmica constante

Velocidad (m/s)	Fuerza de corte promedio total (N)	Fuerza de corte promedio estable (N)	Fuerza de avance promedio total (N)	Fuerza de avance promedio estable (N)
1	304454,86	323427,11	133793,15	150696,02
2	290544,36	299908,06	127937,01	131977,56
3	306845,82	325320	163710,19	184379,83
4	295946,31	321767,09	153045,58	177846,21
5	299697,36	319383,51	153079,2	167633,02
8	290469,77	311559,5	129893,96	143346,08
10	273590,84	287847,54	119845,89	130482,4
14	256914,14	271575,58	102476,44	104562,38

Se puede comprobar, mediante la visualización de las *tablas 8 y 9*, que las fuerzas obtenidas a través del promedio total y las obtenidas a través del promedio estable son muy parejas, por lo que los comentarios realizados en los siguientes apartados *se considerarán válidos para ambos tipos de promedio*.

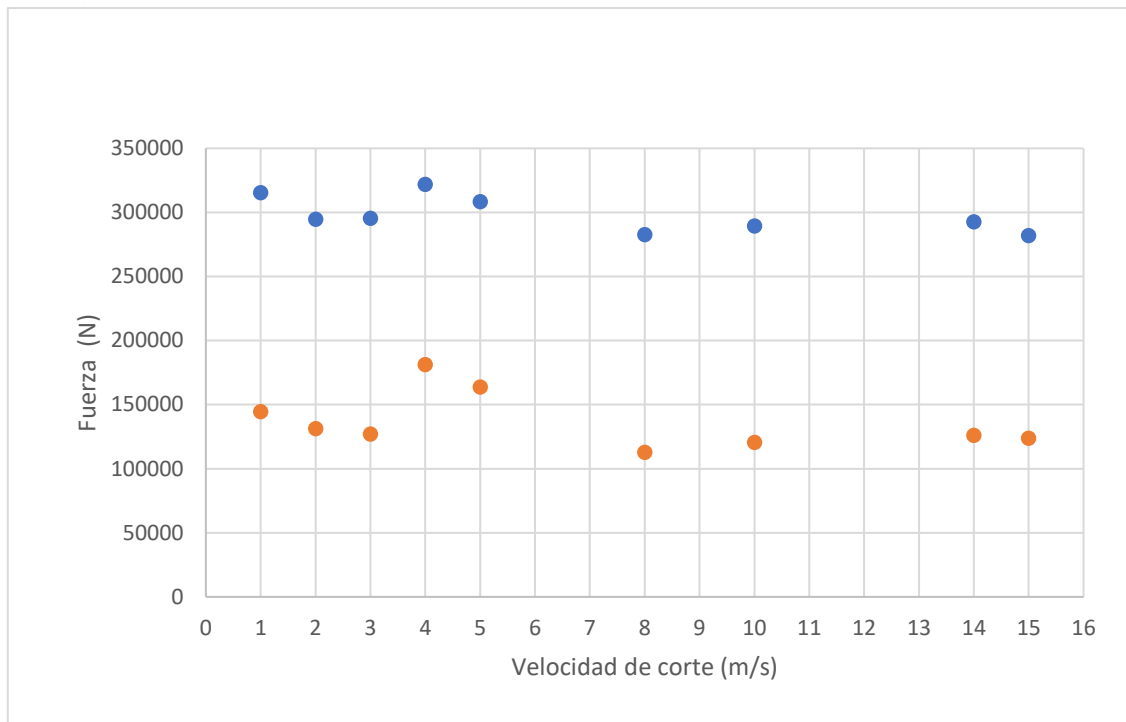


Figura 32. Fuerzas de corte y de avance promedio estable. Conductividad térmica en función de la temperatura.

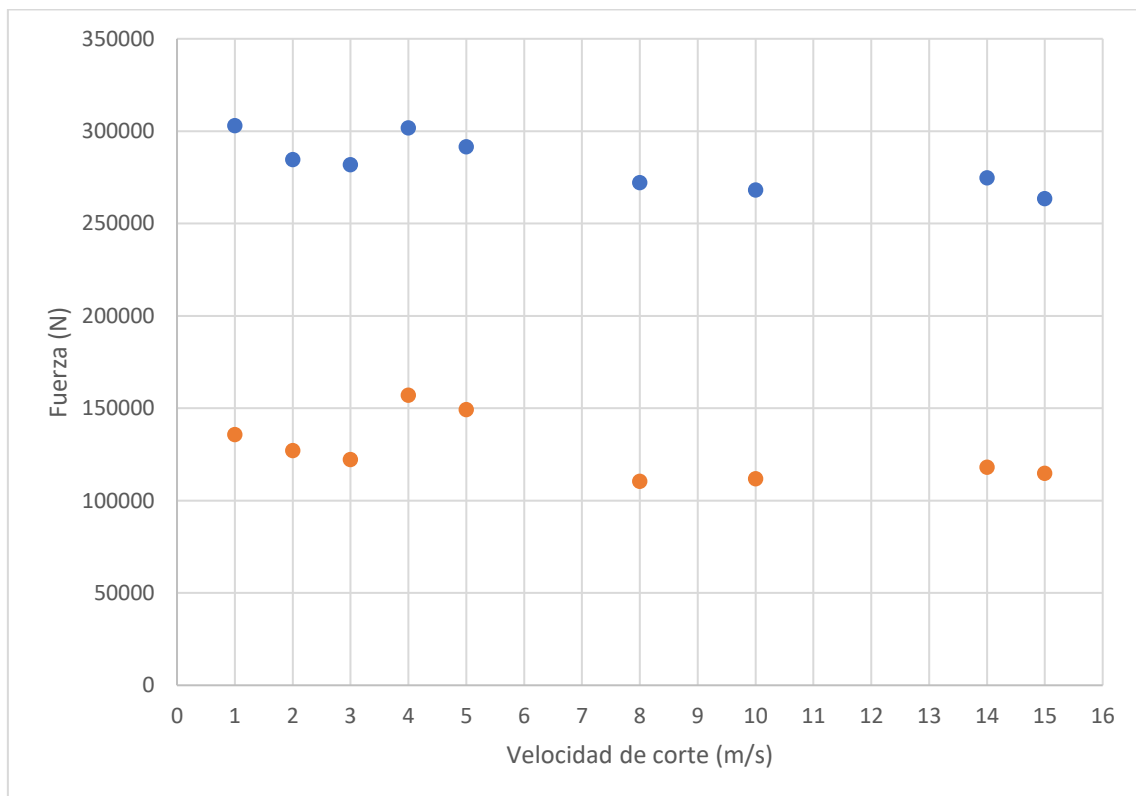


Figura 33. Fuerzas de corte y de avance promedio total. Conductividad térmica en función de la temperatura

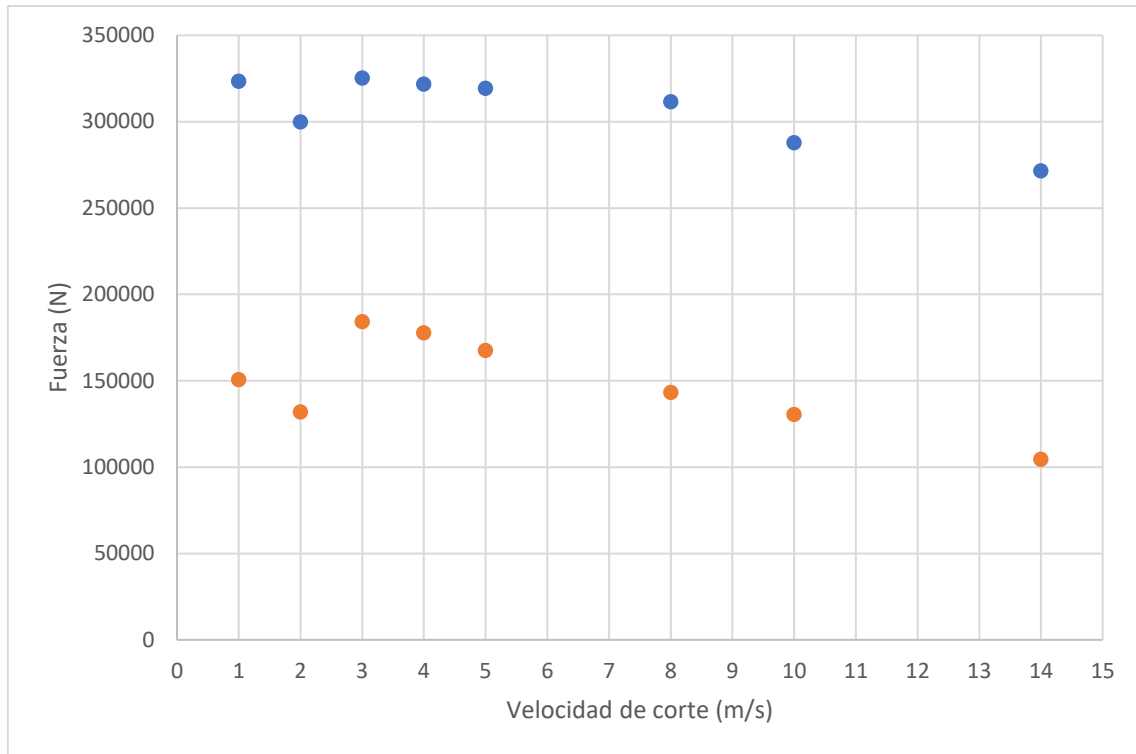


Figura 34. Fuerzas de corte y de avance promedio estable. Conductividad térmica constante

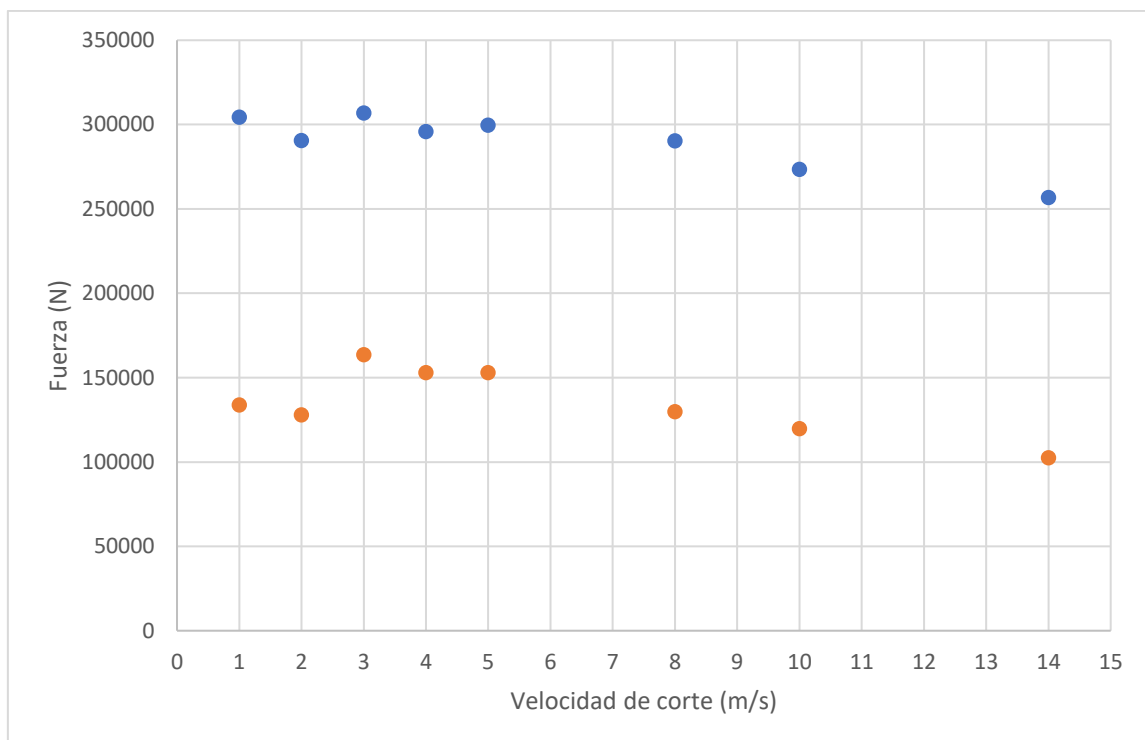


Figura 35. Fuerzas de corte y de avance promedio total. Conductividad térmica constante

c) Comparación de las fuerzas obtenidas en cada simulación

Basándose en los resultados de la simulación, recopilados en las *tablas 8 y 9* y, observando las gráficas de las *figuras 32, 33, 34 y 35*, la variación entre las fuerzas, tanto de avance como de corte, entre cada tipo de simulación varía de la siguiente forma:

- Para un valor velocidad de corte de 1 m/s, la variación entre las fuerzas obtenidas en cada simulación es pequeño, entorno al 0,5%
- A medida que aumenta la velocidad, la temperatura es mayor en el proceso de corte y tiene una mayor influencia en las fuerzas de corte.
- Para $V_c=14$ m/s, la diferencia entre las fuerzas obtenidas es la más alta, aproximadamente un 7%.

Es por esto que *la simulación que mejor representa el comportamiento mecánico del material es aquella en la que la conductividad térmica varía en función de la temperatura.*

d) Influencia de la velocidad en las fuerzas de corte y avance

La tendencia marcada es que las fuerzas disminuyen con el aumento de la velocidad de corte. En la *figura 33* se aprecia que, de 1 a 3 m/s ambas fuerzas disminuyen; a 4 m/s se produce un máximo relativo; y para velocidades mayores las fuerzas disminuyen con la velocidad.

Si se siguiera aumentando la velocidad de corte a velocidades mayores de 15 m/s, se vería que las fuerzas llegarían a un límite asintótico, a partir del cual se mantendrían constantes. Esto sucede porque el material llegaría a su saturación, lo cual significa que llega un momento en el que la temperatura en la zona de corte del material va a ser la misma independientemente de la velocidad de corte empleada y, por lo tanto, las fuerzas necesarias para su mecanizado no van a variar y van a permanecer constantes.

5.1.2 Estudio de la morfología de la viruta

A continuación, se muestra la viruta desprendida tras realizar el corte, a distintas velocidades.

a) Conductividad térmica variable con la temperatura:

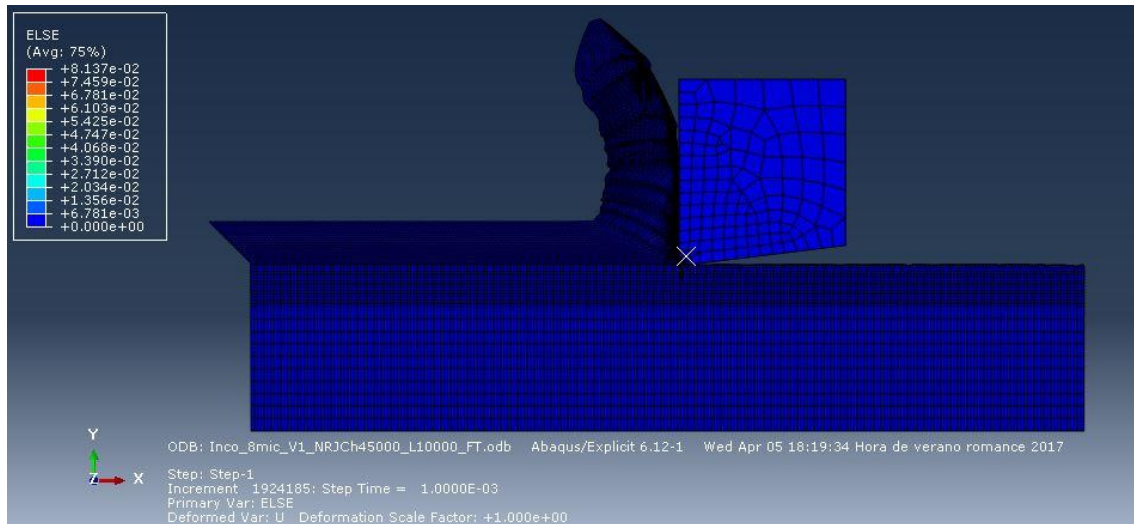


Figura 36. Morfología de la viruta a $V=1\text{m/s}$ y cond. térmica en función de la temperatura.

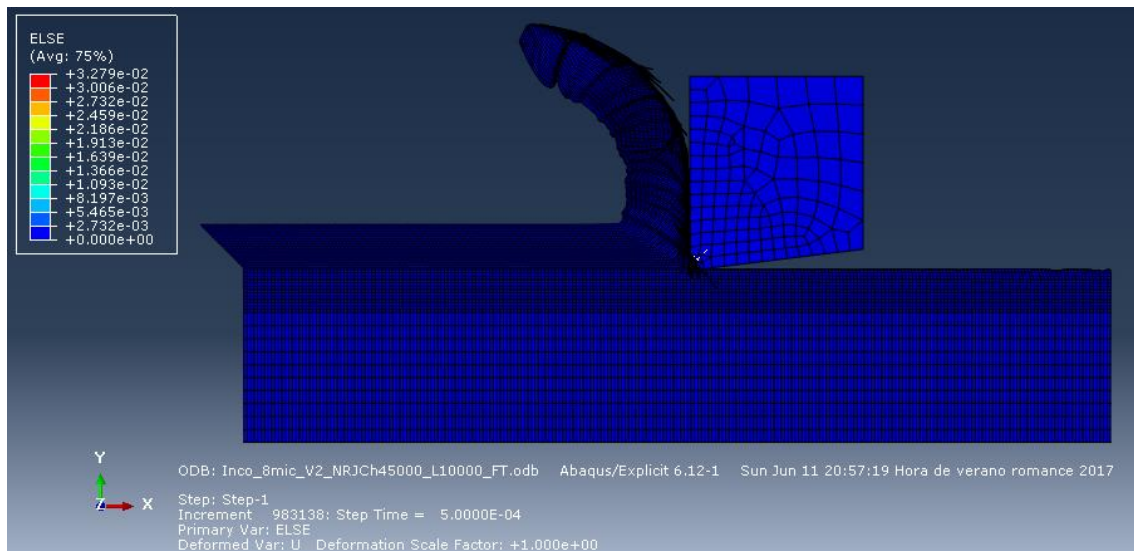


Figura 37. Morfología de la viruta a $V=2\text{m/s}$ y cond. térmica en función de la temperatura.

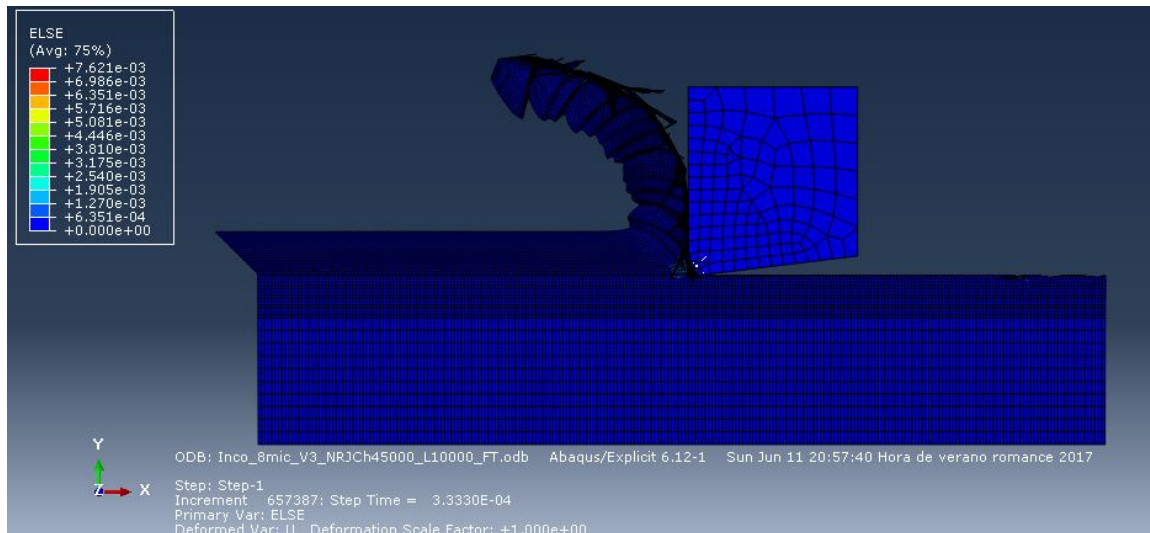


Figura 38. Morfología de la viruta a $V=3\text{m/s}$ y cond. térmica en función de la temperatura.

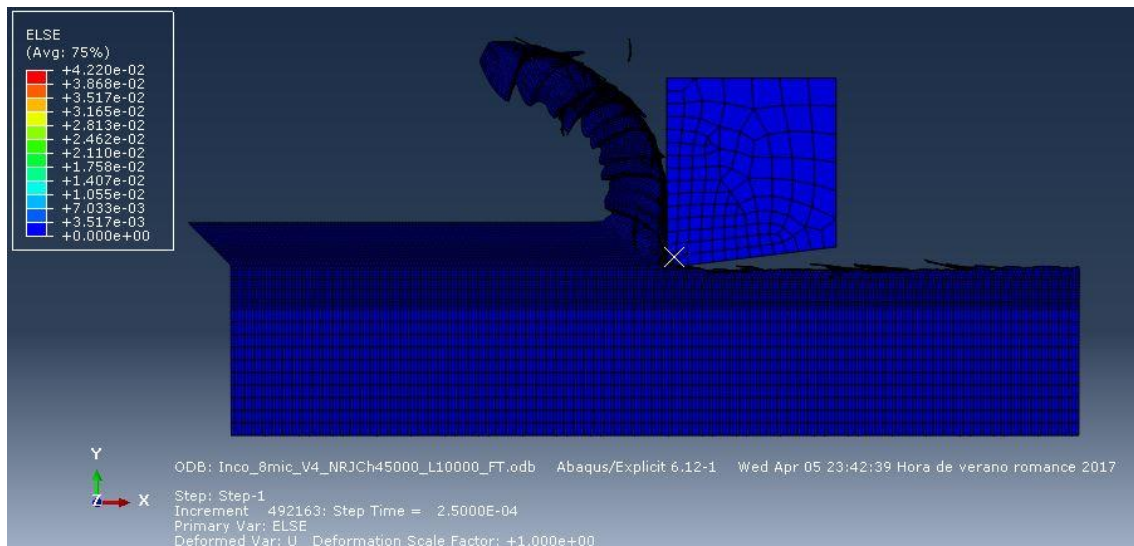


Figura 39. Morfología de la viruta a $V=4\text{m/s}$ y cond. térmica en función de la temperatura.

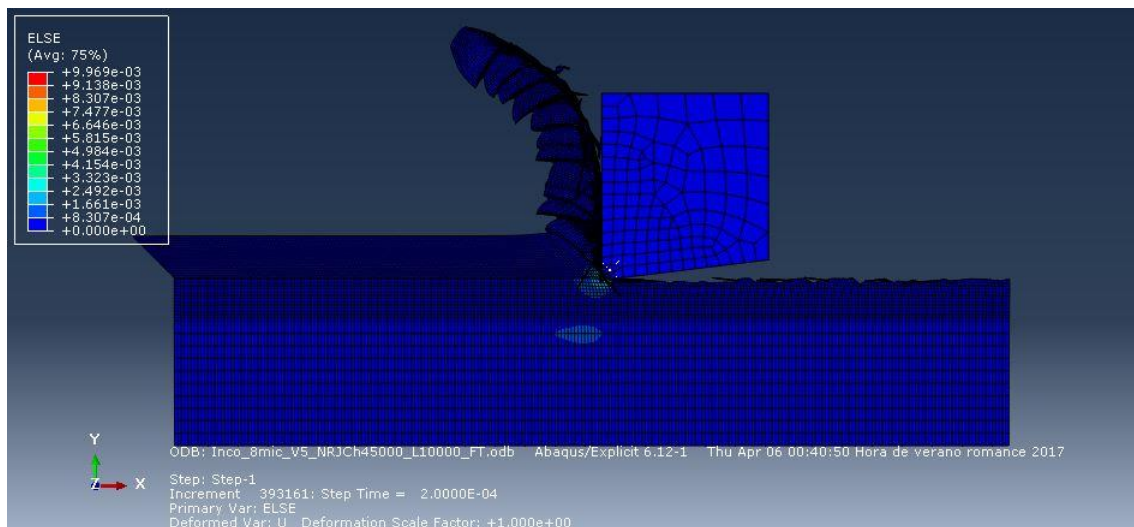


Figura 40. Morfología de la viruta a $V=5\text{m/s}$ y cond. térmica en función de la temperatura.

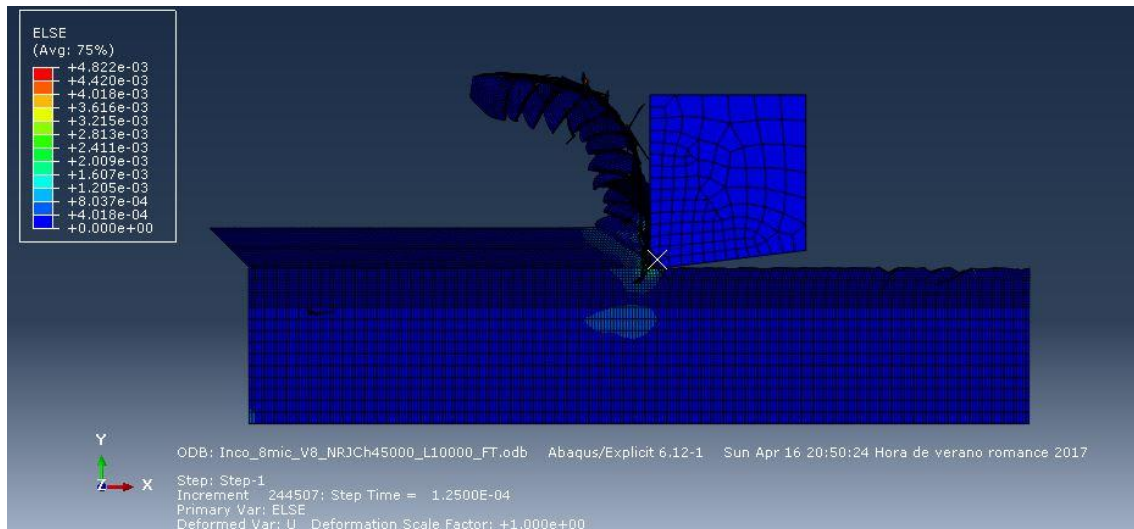


Figura 41. Morfología de la viruta a $V=8\text{m/s}$ y cond. térmica en función de la temperatura.

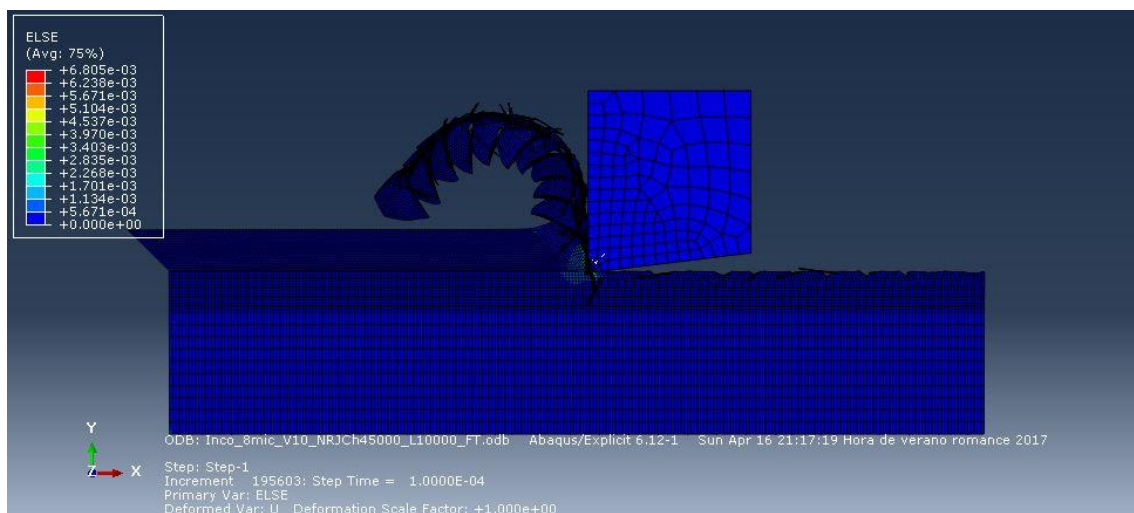


Figura 42. Morfología de la viruta a $V=10\text{m/s}$ y cond. térmica en función de la temperatura.

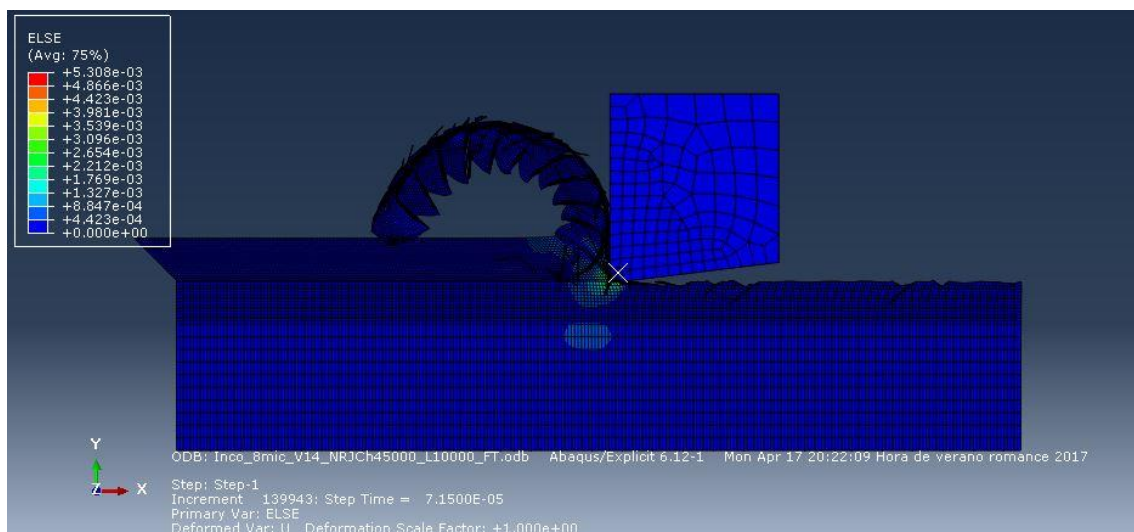


Figura 43. Morfología de la viruta a $V=14\text{m/s}$ y cond. térmica en función de la temperatura.

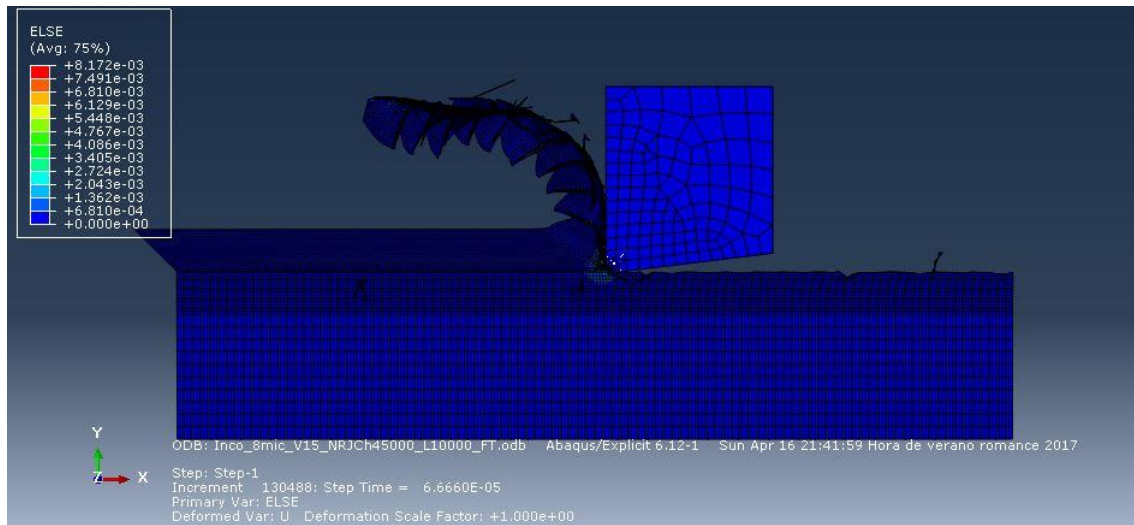


Figura 44. Morfología de la viruta a $V=15\text{m/s}$ y cond. térmica en función de la temperatura.

b) Conductividad térmica constante:

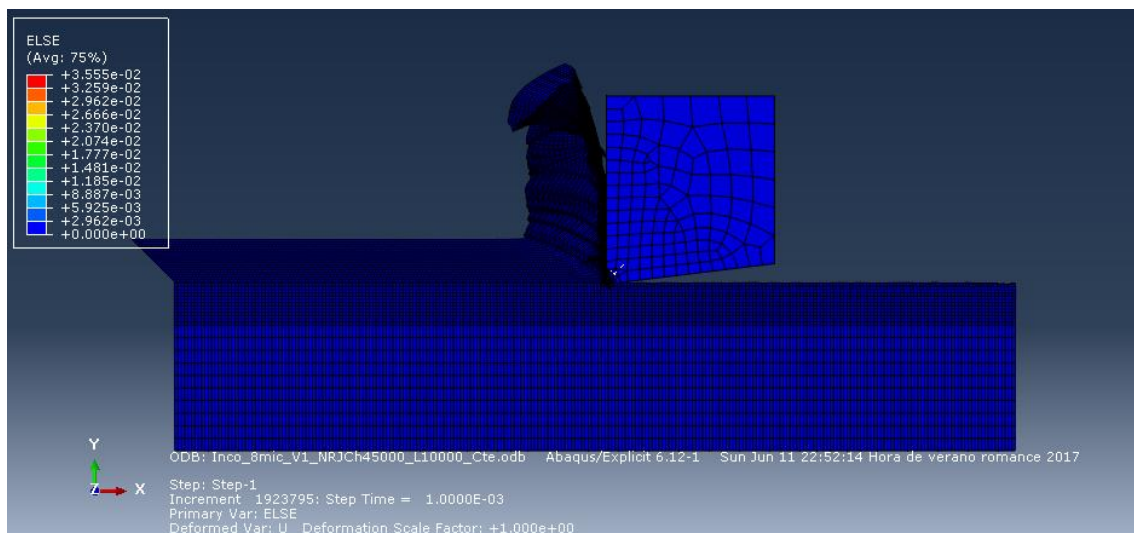


Figura 45. Morfología de la viruta a $V=1\text{m/s}$ y cond. térmica constante.

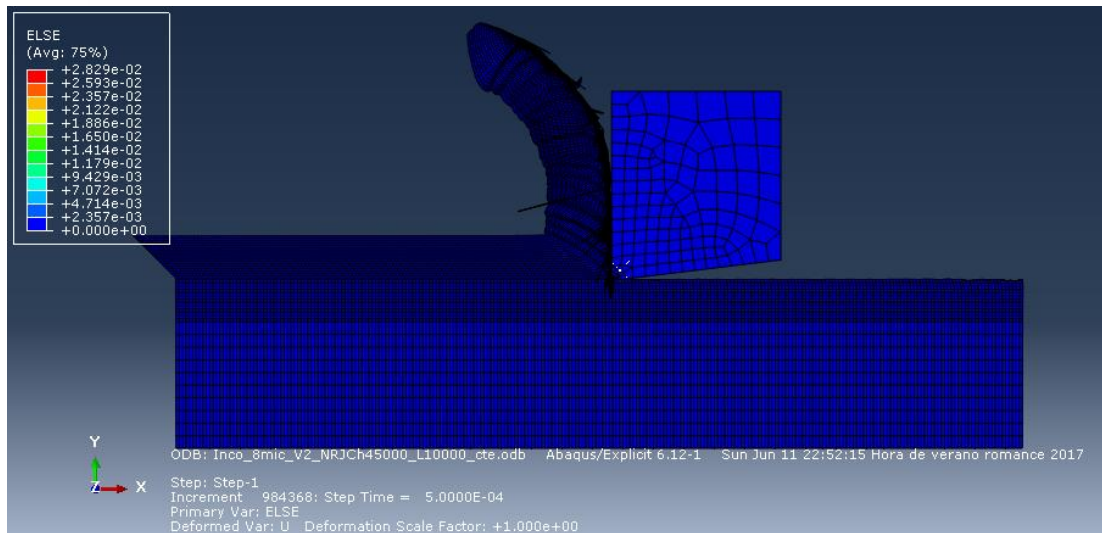


Figura 46. Morfología de la viruta a $V=2\text{m/s}$ y cond. térmica constante.

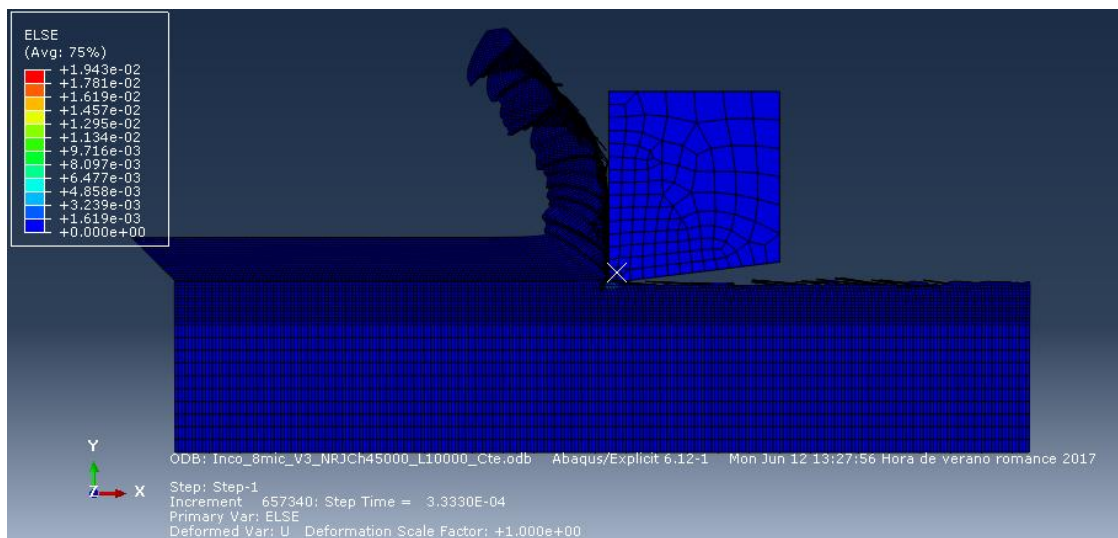


Figura 47. Morfología de la viruta a $V=3\text{m/s}$ y cond. térmica constante.

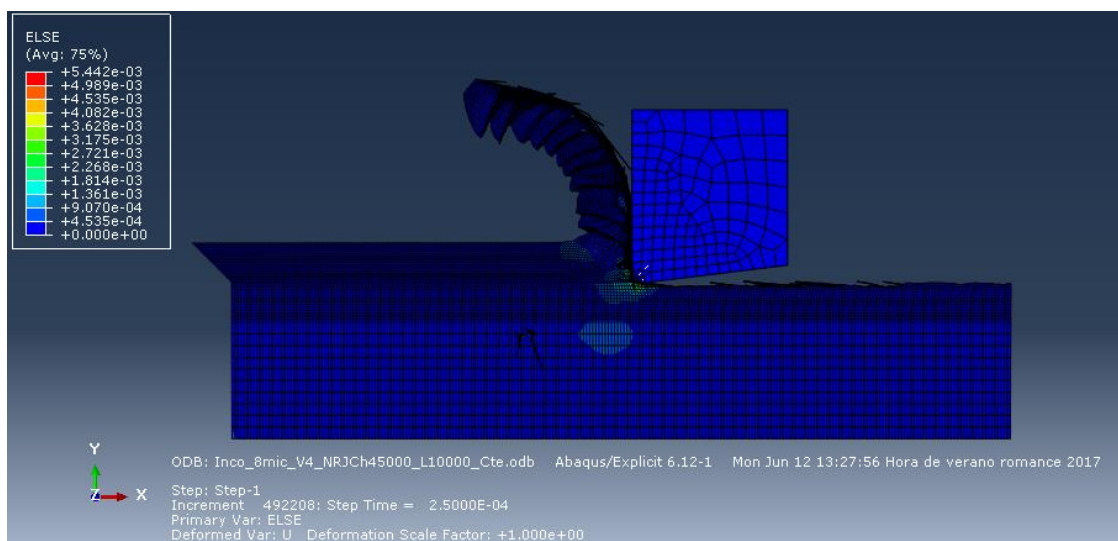


Figura 48. Morfología de la viruta a $V=4\text{m/s}$ y cond. térmica constante.

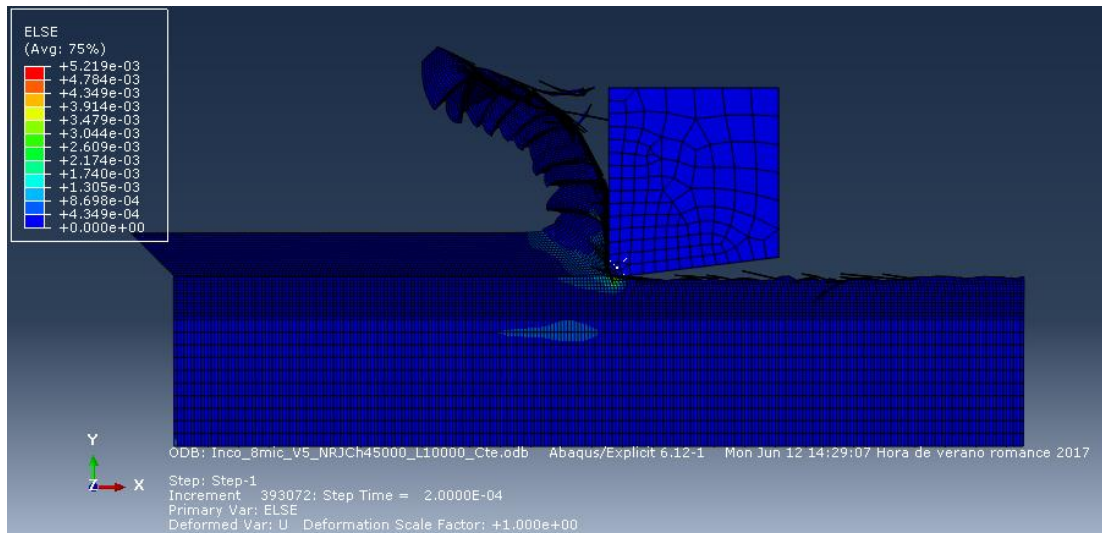


Figura 49. Morfología de la viruta a $V=5\text{m/s}$ y cond. térmica constante.

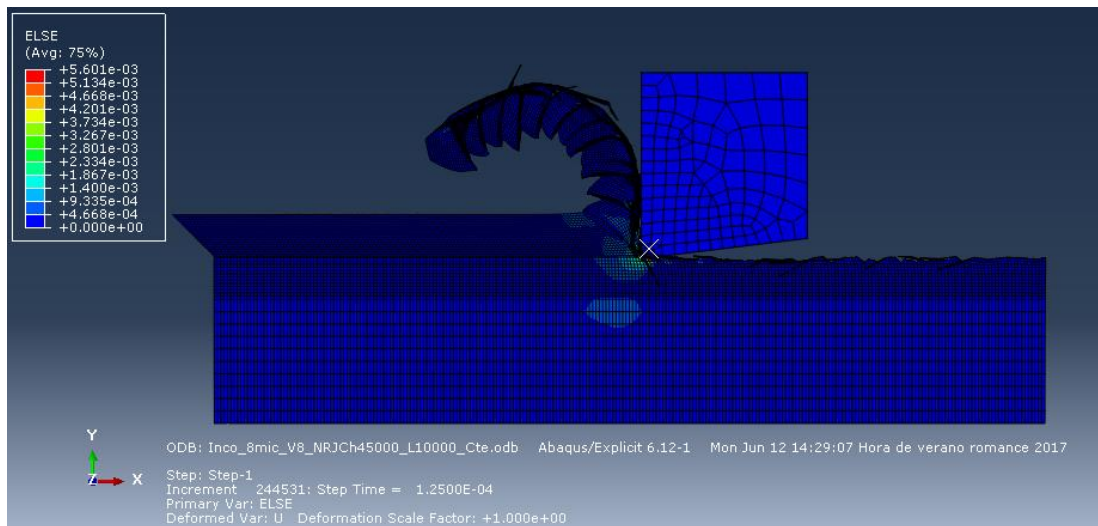


Figura 50. Morfología de la viruta a $V=8\text{m/s}$ y cond. térmica constante.

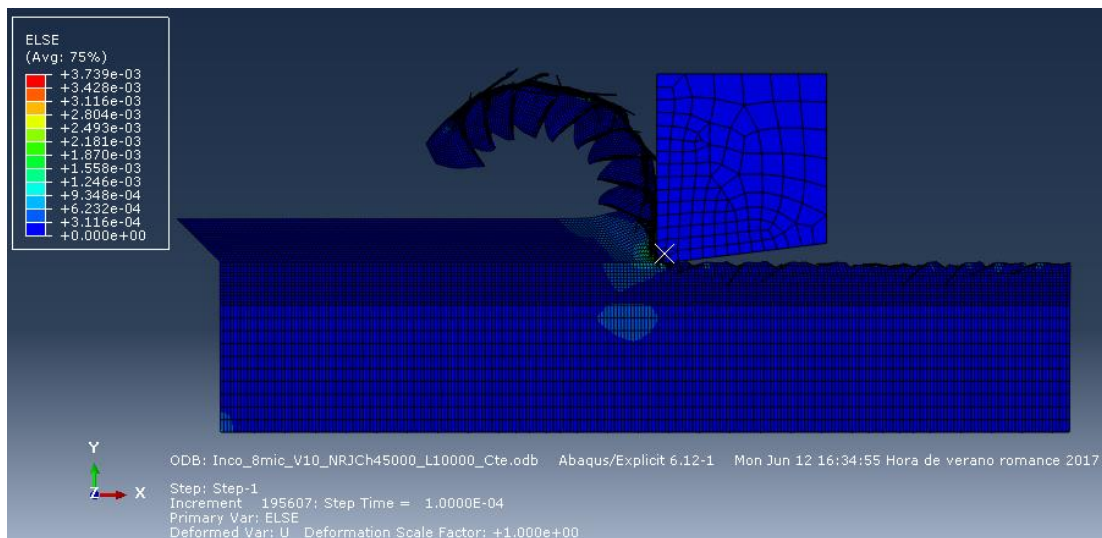


Figura 51. Morfología de la viruta a $V=10\text{m/s}$ y cond. térmica constante.

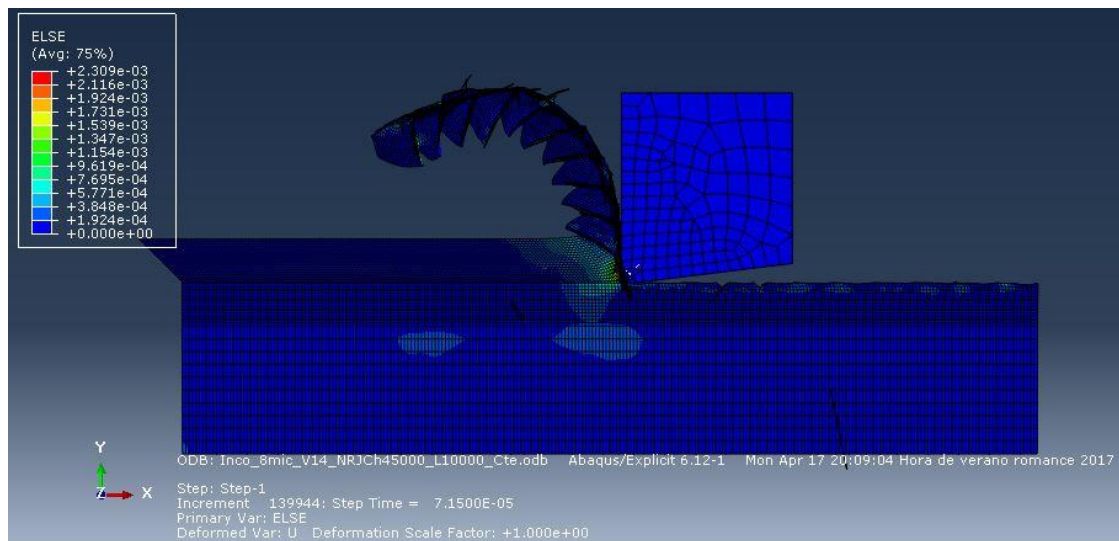


Figura 52. Morfología de la viruta a $V=14$ m/s y cond. térmica constante.

Las imágenes mostradas en las figuras se han tomado para la misma distancia mecanizada en todas las simulaciones, para así poder comparar unas con otras. La geometría de la viruta se observa perfectamente en su totalidad.

Como se puede apreciar desde la *figura 36* hasta la *figura 44* (con la conductividad térmica en función de la temperatura) y de la *figura 45* hasta la *figura 52* (con la conductividad térmica constante), la formación de la viruta en ambos tipos de simulación, para cada velocidad, es bastante similar. En el siguiente apartado se explica la influencia de la velocidad de corte en la morfología de la viruta.

Conforme aumenta la velocidad de corte, la viruta va perdiendo continuidad en su formación, pasando a ser semicontinua. A velocidades bajas, con formación de la viruta de manera continua, la altura de la cresta de la viruta es pequeña y aparecen bastantes crestas. A medida que la velocidad de corte aumenta, la altura de las crestas también aumenta, pero el número de crestas disminuye.

A altas velocidades, el aspecto de la viruta generada se conoce como efecto de “dientes de sierra”.

5.1.3. Estudio del efecto de la conductividad térmica sobre la frecuencia de segmentación

El planteamiento de ejecutar de dos tipos de simulación se realizó para estudiar el efecto que tiene la conductividad térmica en la frecuencia de segmentación.

La *frecuencia de segmentación* sirve para conocer el tiempo que tarda en aparecer una *banda de cizalladura* en la viruta. Para obtener la frecuencia de segmentación ~~de las simulaciones~~ se han anotado, para cada simulación, los tiempos de aparición de las *cuatro primeras bandas de cizalladura* y, con la media de estos tiempos, se ha obtenido la frecuencia de segmentación.

En la *tabla 10* se pueden ver las frecuencias de segmentación de todas las simulaciones.

Tabla 10. Frecuencia de segmentación para cada tipo de simulación.

Velocidad (m/s)	Frecuencia (kHz)	
	Conductividad térmica en función de la temperatura	Conductividad térmica constante
1	18,9	10,6
2	22,2	36,15
3	31,9	37
4	39,1	38
5	58,1	53,5
8	97,1	104,2
10	107,5	101
14	149,3	149,2
15	152,3	-

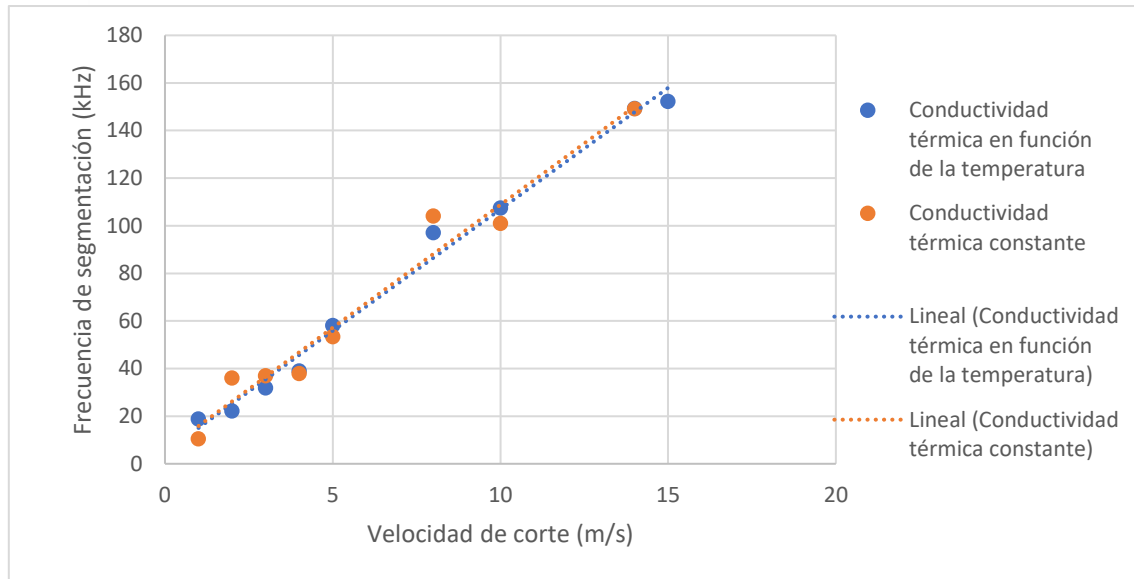


Figura 53. Gráfica de la frecuencia de segmentación frente a la velocidad de corte.

La frecuencia de segmentación varía conforme aumenta la velocidad de corte, haciéndolo de forma lineal, como se aprecia en la *figura 53*.

Las líneas de tendencia de ambos tipos de simulación son similares:

- Los valores de la frecuencia de segmentación para las simulaciones con la conductividad térmica variable con la temperatura se ajustan más a la línea de tendencia. Son menos dispersos.
- Los valores de la frecuencia de segmentación para las simulaciones con la conductividad térmica constante, por el contrario, se dispersan más, como se puede apreciar entre $V=1$ m/s y $V=2$ m/s, que varían unos 25 kHz, para después mantenerse casi constante entre 2 y 4 m/s.

Estudiado el comportamiento, se puede concluir que la conductividad térmica no tiene influencia en la frecuencia de segmentación, a pesar de que sea más preciso el comportamiento del modelo numérico cuando la conductividad térmica es función de la temperatura, pues es el que mejor describe el comportamiento mecánico del material.

5.2. Comparación con los resultados experimentales y validación del trabajo realizado

Para poder comparar las fuerzas obtenidas en la simulación con las fuerzas experimentales, se utilizan la *presión específica de corte* y la *presión específica de avance*, ambas en N/mm^2 , así se pueden comparar los valores, independientemente de la geometría y dimensiones propias de cada modelo. Se obtienen de las siguientes fórmulas:

$$P_{\text{corte}} = \frac{F_{\text{corte}}}{a \cdot p}$$

$$P_{\text{avance}} = \frac{F_{\text{avance}}}{a \cdot p}$$

Donde:

- “a” es el avance, que es 0’1 mm en la simulación
- “p” es la profundidad, 1 mm en la simulación

Aplicando estas fórmulas, a partir de las fuerzas promedio generadas en la simulación, se obtienen los valores de las presiones representados en las *tablas 11 y 12*.

Tabla 11. Presiones de corte y de avance con conductividad térmica en función de la temperatura.

Velocidad de corte (m/s)	Presión de corte promedio total (MPa)	Presión de corte promedio estable (MPa)	Presión de avance promedio total (MPa)	Presión de avance promedio estable (MPa)
1	3030,25	3156,09	1358,97	1447,37
2	2847,13	2947,98	1271,30	1314,87
3	2819,31	2955,51	1223,25	1270,25
4	3017,65	3219,90	1570,55	1812,39
5	2916,21	3085,58	1493,73	1639,10
8	2722,37	2826,90	1105,08	1128,77
10	2682,96	2894,22	1118,81	1206,69
14	2748,46	2926,94	1182,16	1261,79
15	2635,61	2820,57	1149,24	1239,19

Tabla 12. Presiones de corte y de avance con conductividad térmica constante.

Velocidad (m/s)	Presión de corte promedio total (MPa)	Presión de corte promedio estable (MPa)	Presión de avance promedio total (MPa)	Presión de avance promedio estable (MPa)
1	3044,55	3234,27	1337,94	1506,96
2	2905,44	2999,08	1279,37	1319,78
3	3068,46	3253,20	1637,10	1843,79
4	2959,46	3217,67	1530,46	1778,46
5	2996,97	3193,84	1530,79	1676,33
8	2904,69	3115,59	1298,94	1433,46
10	2735,91	2878,48	1198,46	1304,82
14	2569,14	2715,76	1024,76	1045,62

A partir de las *tablas 11 y 12*, se obtienen las gráficas de las presiones de corte y de avance en función de la velocidad, *figuras 54, 55, 56 y 57*, las cuales serán utilizadas para comparar con la literatura de datos experimentales.

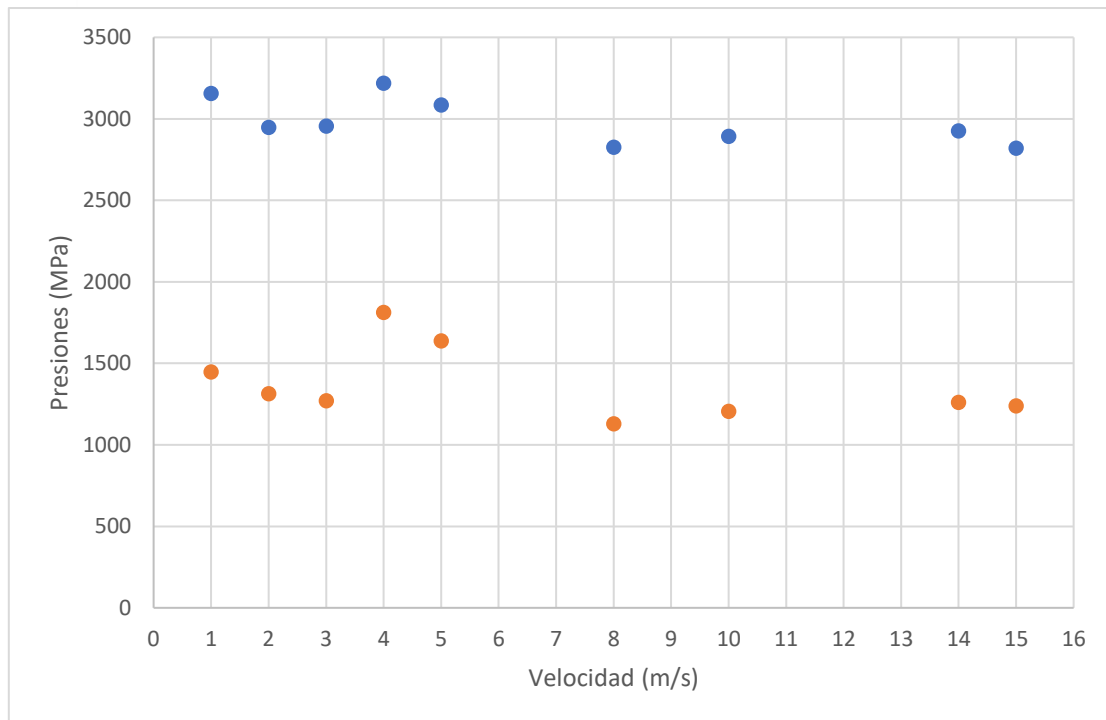


Figura 54. Presiones de corte y de avance promedio estable. Conductividad térmica en función de la temperatura.

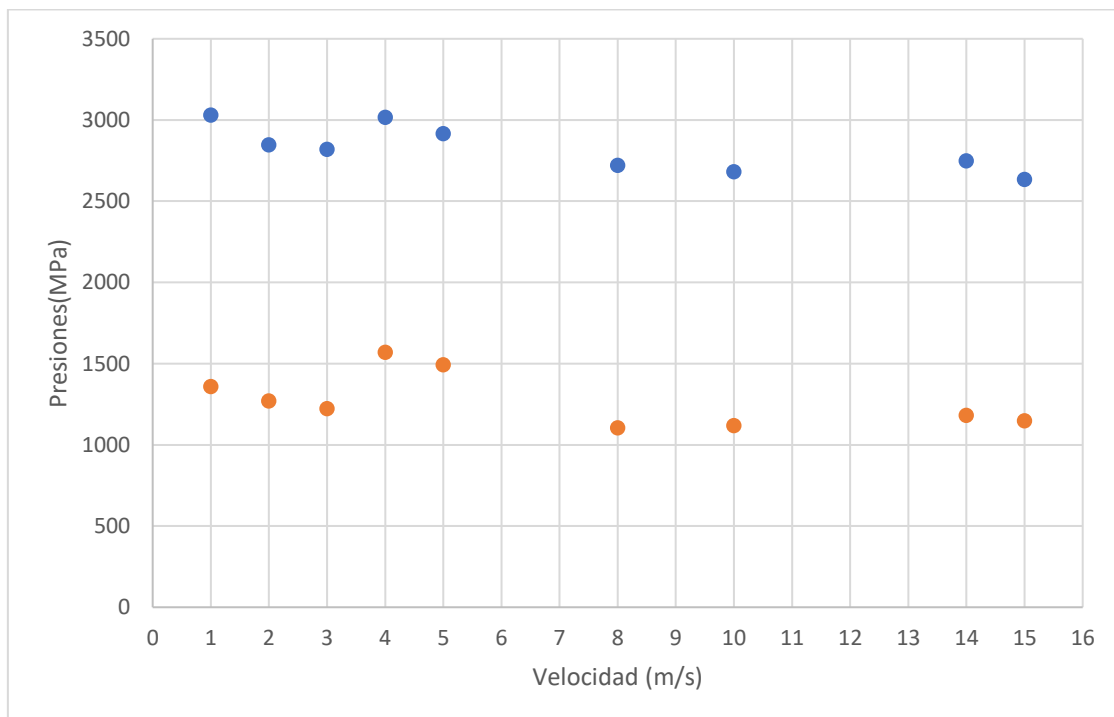


Figura 55. Presiones de corte y de avance promedio total. Conductividad térmica en función de la temperatura.

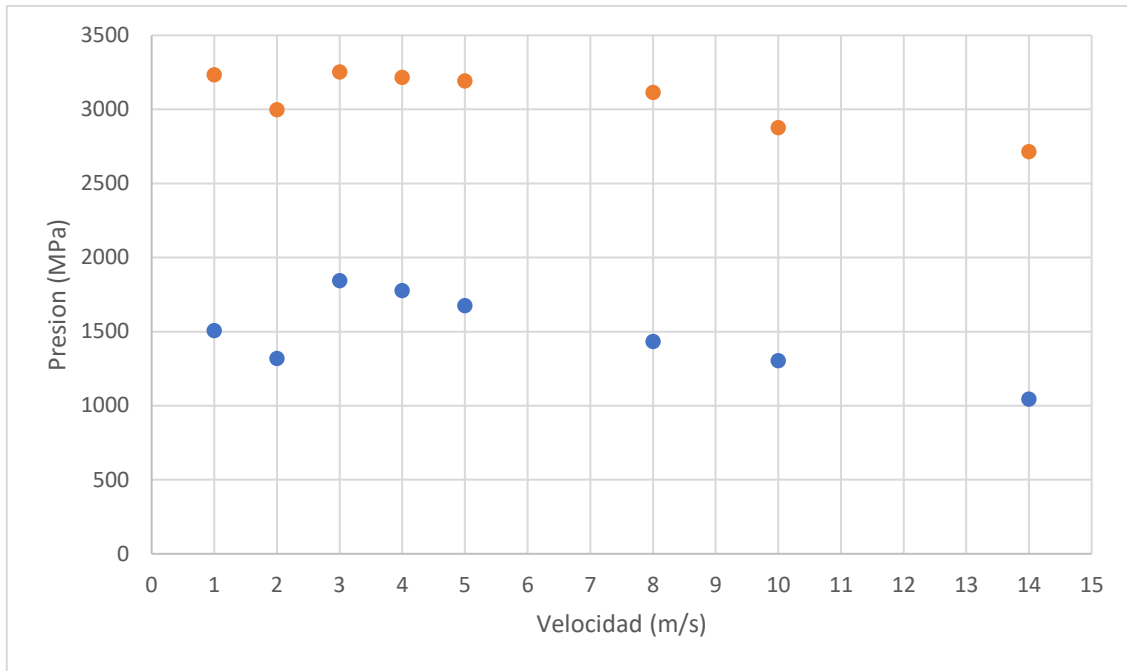


Figura 56. Presiones de corte y de avance promedio estable. Conductividad térmica constante.

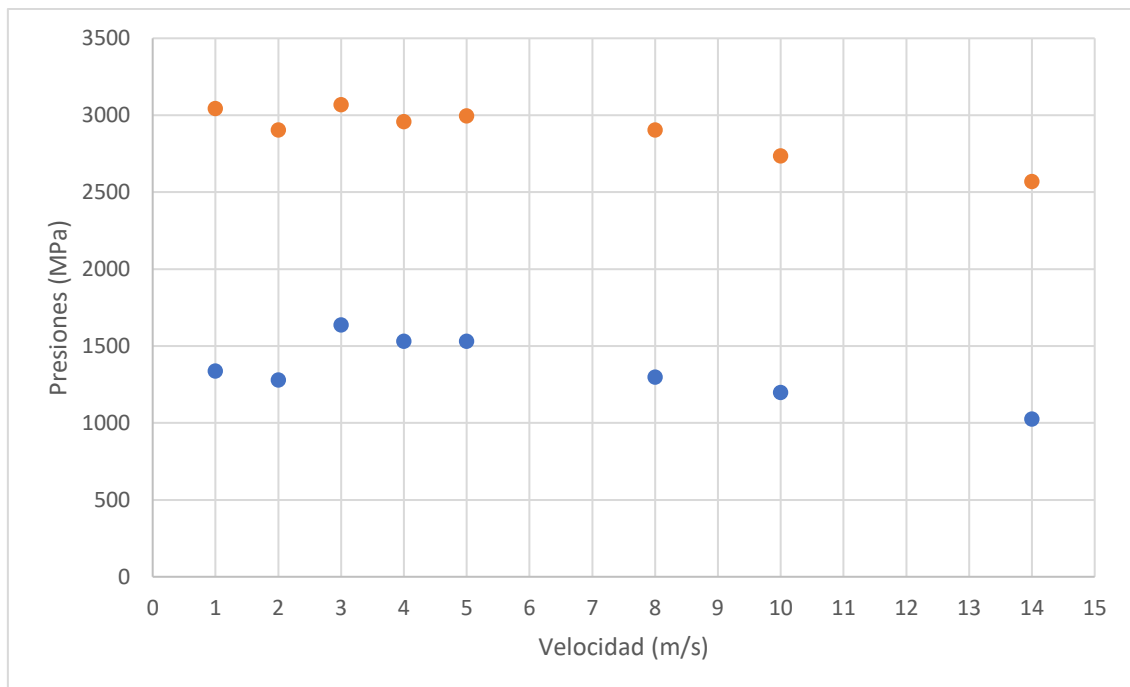


Figura 57. Presiones de corte y de avance promedio total. Conductividad térmica constante.

Se comparan las presiones de corte y de avance resultado de la simulación en ocho gráficas: cuatro gráficas de la simulación con conductividad térmica constante y cuatro gráficas de la simulación con conductividad térmica variable con la temperatura.

a) Conductividad térmica constante

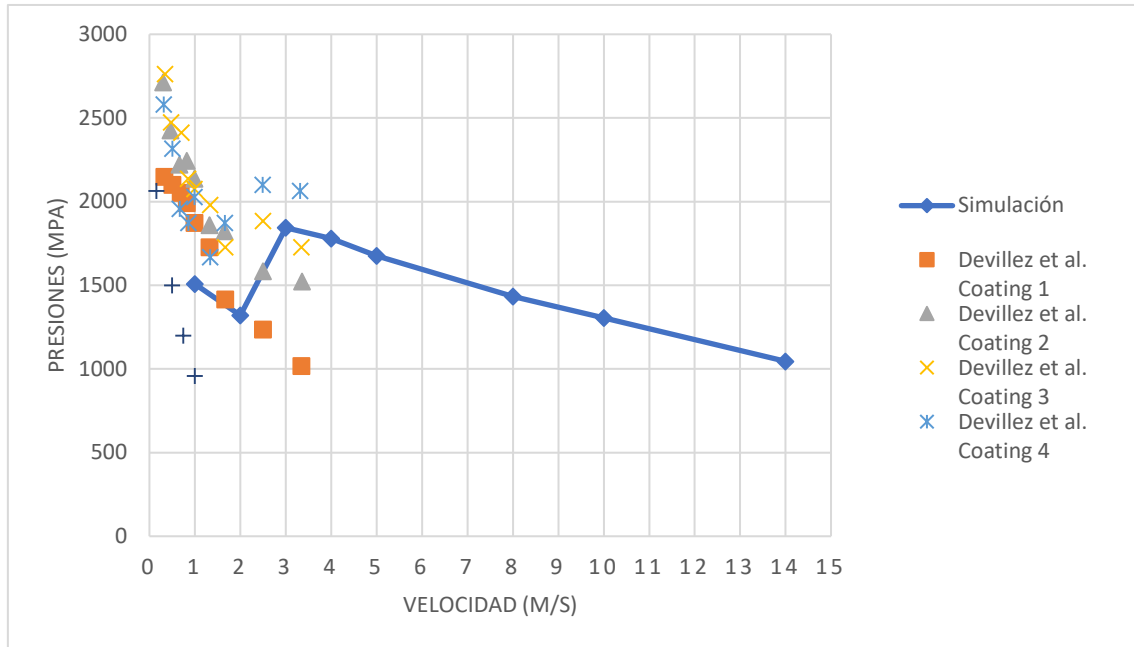


Figura 58. Presiones de avance, promedio estable. Cond. térmica constante.

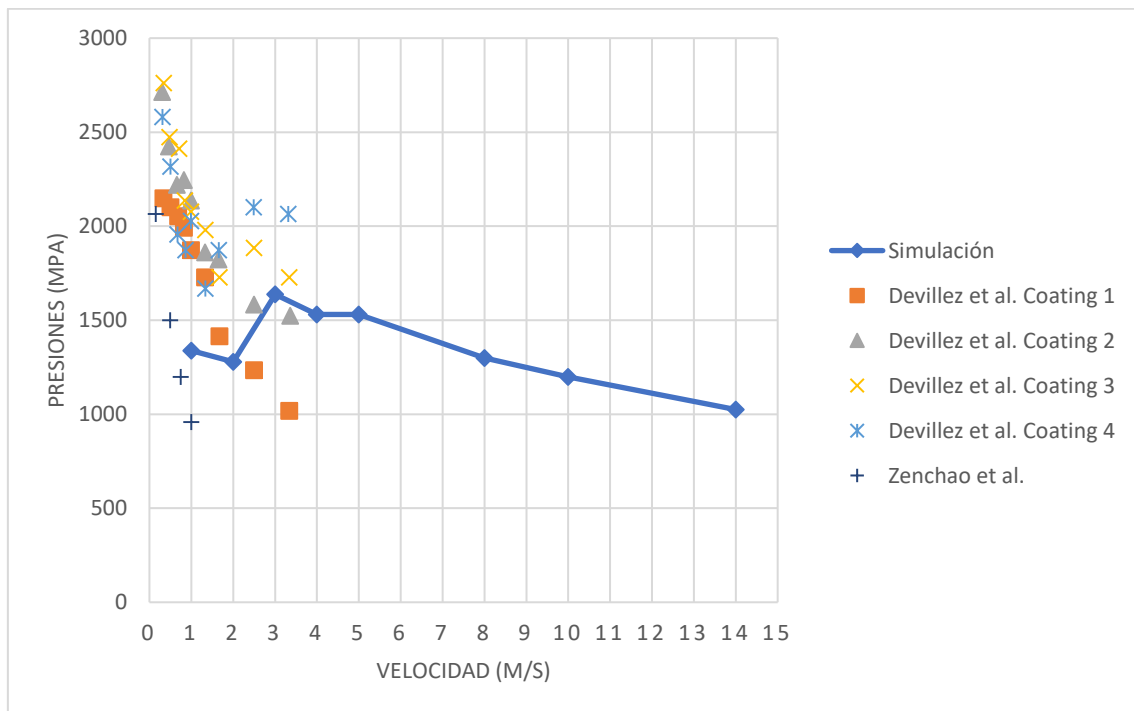


Figura 59. Presiones de avance, promedio total. Cond. térmica constante.

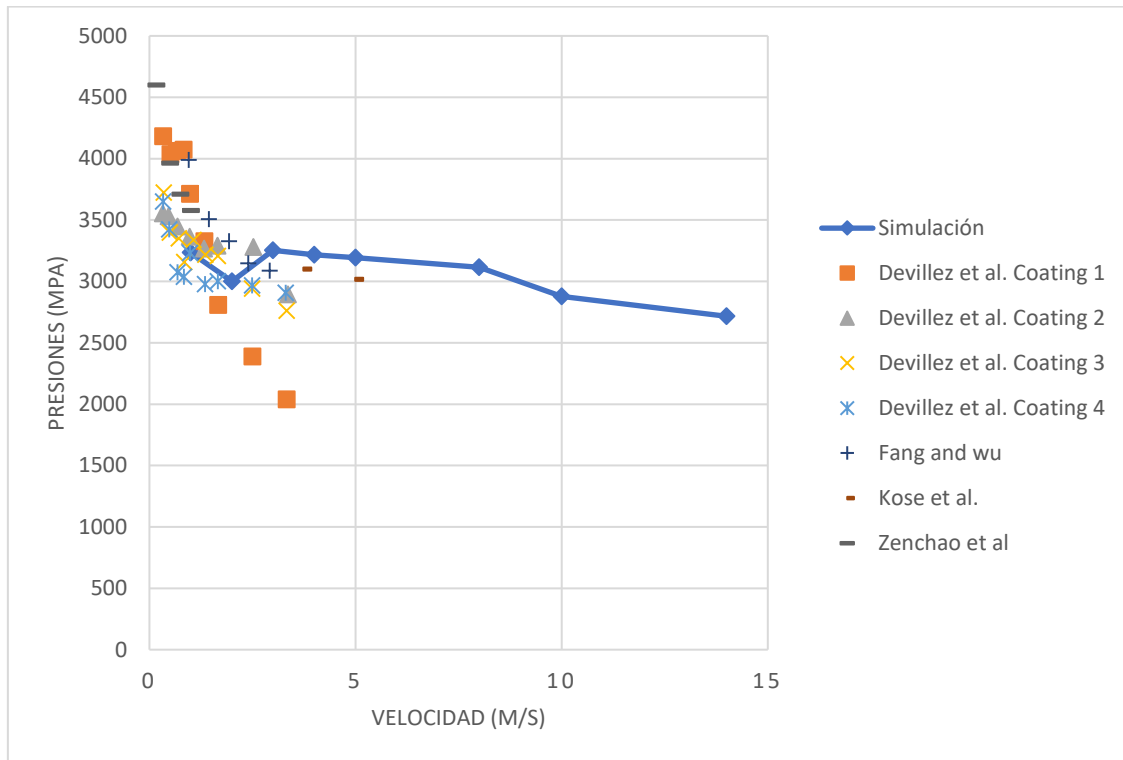


Figura 60. Presiones de corte, promedio estable. Cond. térmica constante.

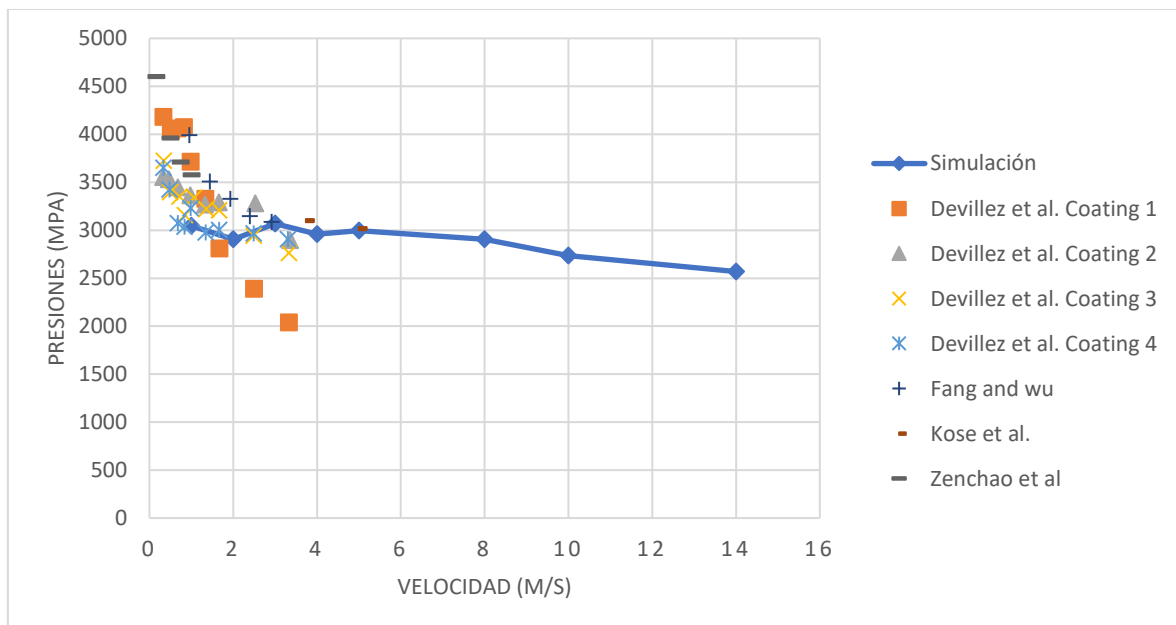


Figura 61. Presiones de corte, promedio total. Cond. térmica constante.

b) Conductividad térmica variable con la temperatura

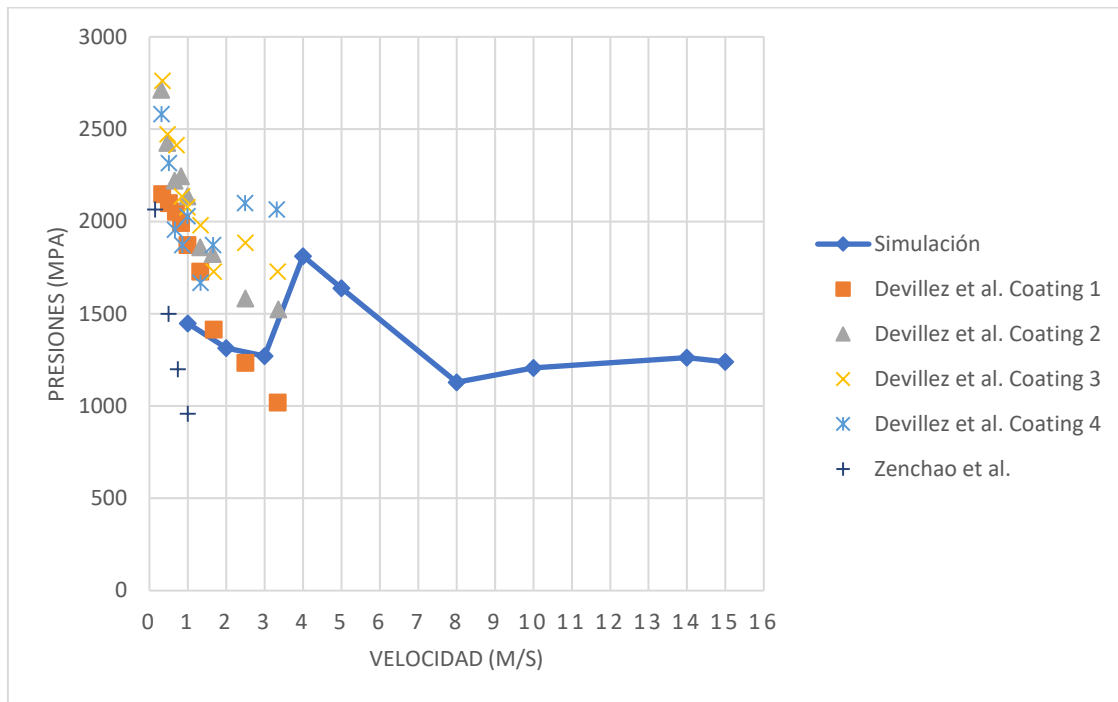


Figura 62. Presiones de avance, promedio estable. Cond. térmica en función de la temperatura.

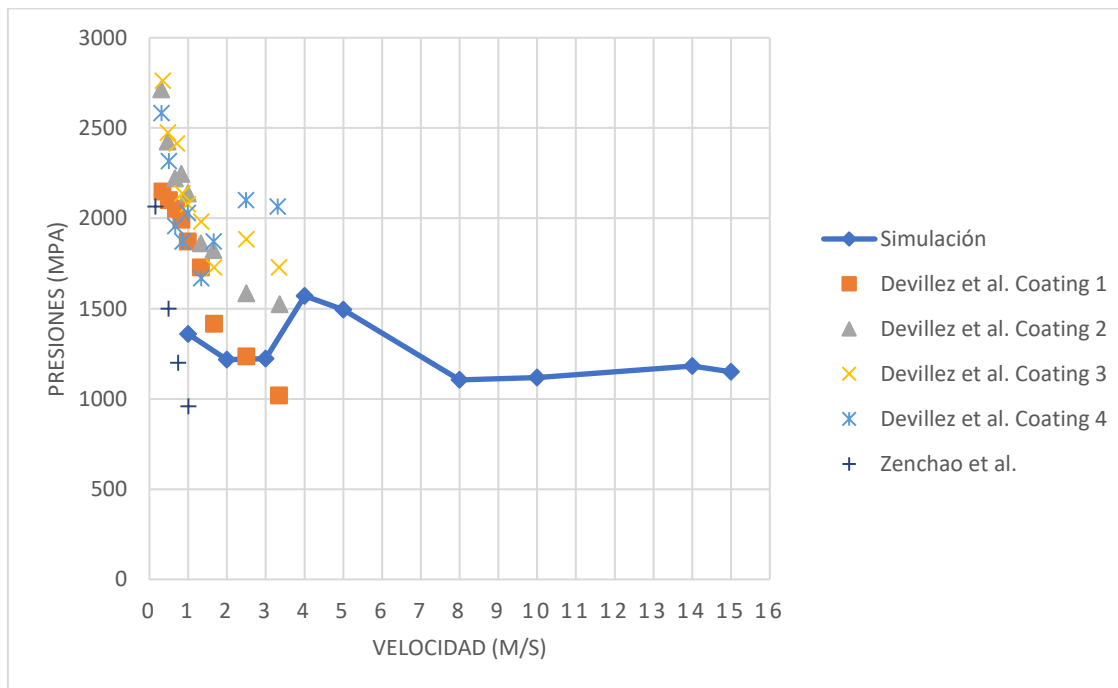


Figura 63. Presiones de avance, promedio total. Cond. térmica en función de la temperatura.

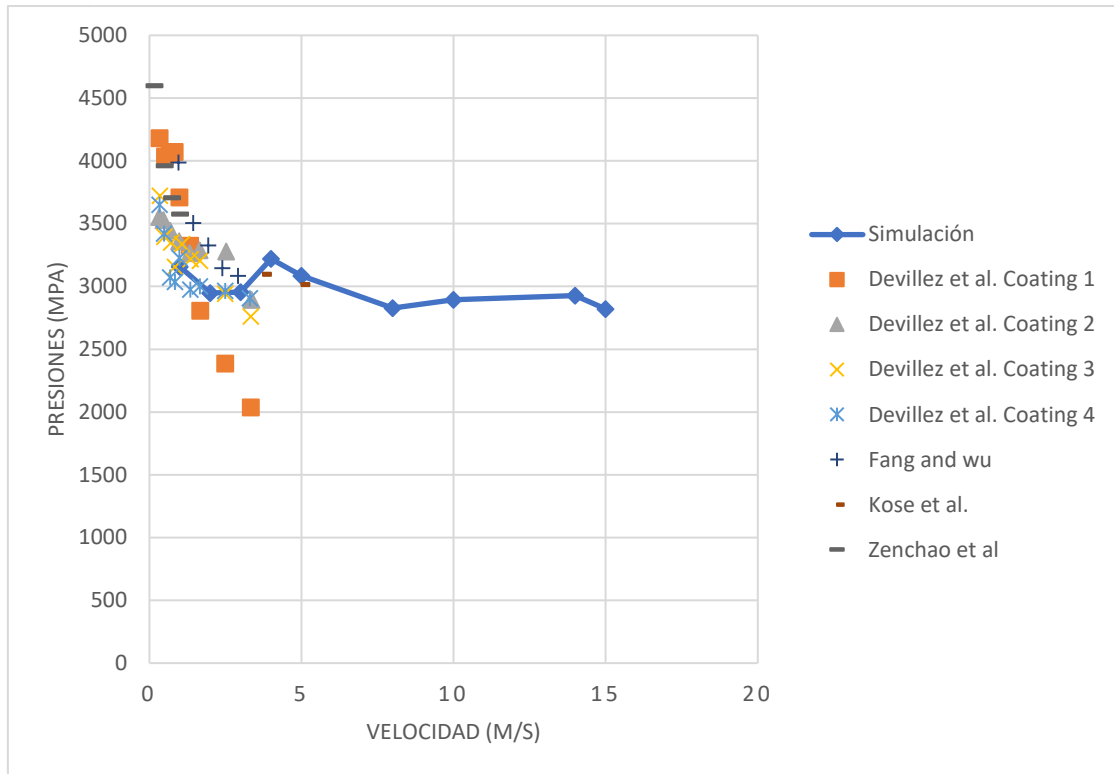


Figura 64. Presiones de corte, promedio estable. Cond. térmica en función de la temperatura.

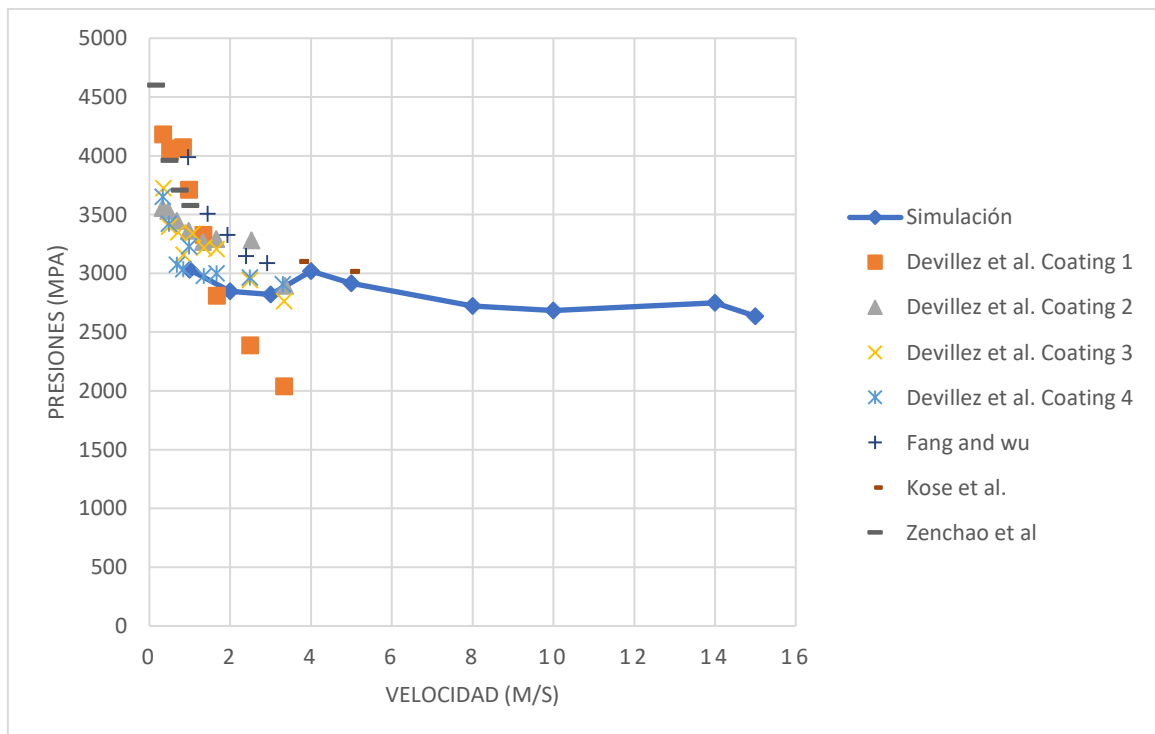


Figura 65. Presiones de corte, promedio total. Cond. térmica en función de la temperatura.

De la *figura 58* hasta la *figura 65* se muestran la gráfica de las presiones experimentales y las presiones de la simulación para cada tipo de presión (corte o avance) y cada tipo de promedio para el cálculo de la *presión media* (total o estable).

Como se aprecia observando las gráficas, existen diferencias entre todos los valores de presiones mostrados, tanto experimentales como de la simulación, esto se debe, como se indicó en el apartado IV, a que cada ensayo está realizado con unas condiciones de corte determinadas, con un tipo de herramienta distinto y el material no presenta el mismo tratamiento térmico superficial. A pesar de esto, los valores de las presiones obtenidos en la simulación presentan la misma tendencia que los valores de las presiones experimentales obtenidos de la literatura. También, todos los valores están agrupados alrededor de los 3000 MPa en las presiones de corte y entorno a 1700 MPa en las presiones de avance.

Con esto, se puede concluir que el modelo numérico empleado para la obtención de los resultados mediante el método de elementos finitos es correcto. Esto significa que, a través de este modelo se puede simular el proceso de corte ortogonal de *Inconel 718* y obtener unos resultados que se asemejan a los que obtendríamos de proceso experimental. Por tanto, las presiones de corte y avance obtenidas de la simulación, al ser comparadas con presiones experimentales, validan el modelo numérico y demuestran que el comportamiento del material es el apropiado.

Apartado VI

6. Conclusiones y trabajos futuros

6.1. Conclusiones

El principal objetivo del trabajo ha sido la *obtención de un modelo numérico*, utilizando simulación numérica mediante el software **ABAQUS**, con el objetivo de validar el comportamiento mecánico del material frente al comportamiento manifestado en distintos ensayos experimentales. Se han estudiado las fuerzas de corte y avance, la morfología de la viruta generada en el proceso de mecanizado y la frecuencia de segmentación de la viruta. Se han obtenido las siguientes conclusiones:

1. Se ha validado el modelo numérico utilizado para el proceso de mecanizado de *Inconel 718* por comparación con los distintos ensayos experimentales de *Devillez et al.* [8], *Fang and Wu* [11], *Kose et al.* [12] y *Zenchao et al.* [13].
2. *Inconel 718* es un material de difícil maquinabilidad, por lo que el desgaste de la herramienta es elevado, pero utilizando unas condiciones de corte óptimas, se puede economizar su producción en la industria. La iteración de este modelo numérico permitirá establecer condiciones de corte idóneas que, posteriormente, pueden extrapolarse a ensayos experimentales al objeto de economizar los ensayos.
3. Aumentando la velocidad de corte en el proceso de mecanizado, las fuerzas de corte y avance necesarias para el arranque de material disminuyen.
4. La viruta generada en el corte va perdiendo continuidad según aumenta la velocidad de corte, lo que es favorable para su evacuación y evitar que moleste durante el proceso.
5. La conductividad térmica no influye en la frecuencia de segmentación de la viruta.
6. Las fuerzas generadas en las simulaciones difieren un 0,5% para $V_c=1$ m/s, pero a medida que la velocidad de corte aumenta, también lo hacen la temperatura en la zona de corte y la conductividad térmica y, por tanto, la diferencia entre fuerzas crece hasta llegar al 7% para $V_c=14$ m/s.

6.2. Trabajos futuros

Para aumentar el conocimiento del comportamiento de *Inconel 718* frente al proceso de mecanizado para el corte ortogonal a altas velocidades, se proponen los siguientes posibles estudios:

- Simulación del proceso de corte ortogonal empleando distintas herramientas, ya sea con distintos materiales para el filo, como con distintos tratamientos superficiales, de cara encontrar un filo en el que se disminuya el desgaste en el proceso de mecanizado.
- Una vez analizado cuál sería el mejor material y tratamiento superficial para que el filo de la herramienta tenga mayor vida en servicio, se podría ensayar la modificación de la geometría del filo y estudiar su influencia en el desgaste.
- Realizar ensayos experimentales con las condiciones de corte de la simulación del trabajo para acotar el error de la simulación y, con ello, su fiabilidad.

Apartado VII

7. Marco regulador

En el ámbito universitario, la redacción del TFG está regulado por:

- El R.D. 1393/2007, de 29 de octubre, por el que se establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales.
- La normativa de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M).
- La regulación específica de los títulos de Grado que se imparten en la Escuela Politécnica Superior de la UC3M.

Se han utilizado el software *ABAQUS/explicit* para la simulación y la suite ofimática *Microsoft Office 365 ProPlus* para la redacción del trabajo, ambos con licencia de uso educativo propiedad de la UC3M. El autor ha utilizado su equipo informático con la correspondiente licencia de uso privativo del sistema operativo *Microsoft Windows 10*.

Trata este proyecto, como se ha visto en los puntos anteriores, de la realización de varios procesos de simulación numérica utilizando software. No se ejecutan ensayos físicos de los que se puedan derivar riesgos laborales profesionales, ni existe un marco normativo, ni convenios laborales que puedan aplicar en este ámbito. Todo se somete a la normativa general establecida en el Real Decreto 1791/2010, de 30 de diciembre, por el que se aprueba el *Estatuto del Estudiante Universitario*. Se tiene también, como referente la “*Carta de derechos y deberes de los estudiantes de la UC3M*” aprobada por el Consejo de Gobierno en sesión de 4 de marzo de 2005.

Podría tenerse como referencia, en el ámbito de los ensayos de simulación, aunque pertenece al dominio de las relaciones laborales, el Real Decreto 488/1997, de 14 de abril por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas.

En cuanto a las responsabilidades que puedan desprenderse de la elaboración del trabajo, hay que señalar que ha sido desarrollado respetando los derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan en las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía; así como los derechos de propiedad industrial o intelectual que pudiese afectar a cualquier persona física o jurídica.

7.1. Patentado del modelo numérico

A la hora de realizar cualquier tipo de trabajo, es importante proteger la propiedad intelectual, para ello es necesario registrarlo.

La protección del presente trabajo conllevaría el registro del modelo numérico en la oficina de patentes.

Como se ha explicado anteriormente, el proceso de modelización numérica consiste en la representación teórica de un fenómeno real, en este caso un fenómeno ingenieril como es el proceso de mecanizado. Para ello se definen una serie de parámetros (geometría, condiciones de contorno, condiciones de carga, etc.) con los cuales obtener unos resultados mediante cálculo computerizado.

El artículo 52 "Invenciones patentables" de la Convención Europea de Patentes [14] establece que las patentes europeas garantizan cualquier invención, en todos los campos de la tecnología, que prueben nuevos o mejoras y sean susceptibles de aplicación industrial, a excepción de: teorías científicas, métodos matemáticos, creaciones estéticas, teorías científicas, programas de ordenador.

Según este artículo, no se puede patentar un modelo numérico, pero se redactó la Decisión "T 1227/05 (*Circuit simulation I/Infineon Technologies*) of 13.12.2006" [15] de la Oficina Europea de Patentes por la que se reivindica la protección de los modelos numéricos:

- (Punto 3.1): La simulación de un circuito sujeto a un ruido $1/f$ constituye un propósito técnico adecuadamente definido para una invención implementada en ordenador funcionalmente limitada a dicho propósito.
- (Punto 3.4.2.): Aplicaciones técnicas específicas de métodos de simulación implementados en ordenador se ven como métodos modernos que forman parte esencial de los procesos de fabricación y constituyen principalmente pasos intermedios en los procesos de producción actual. Así, a tales métodos de simulación no se les puede negar el efecto técnico simplemente basándose en que no incorporan una versión final del producto de forma física.
- (Punto 4): La formulación matemática necesaria para definir los pasos del método, son parte de las características técnicas de la invención y sirven para valorar la actividad inventiva.

Por lo que, actualmente, se puede proteger en la Oficina Europea de Patentes un modelo numérico, aunque hay que hacerlo de una manera determinada.

Apartado VIII

8. Análisis del entorno socio-económico

En este apartado se detallará el presupuesto del proyecto realizado y el análisis socio-económico del proceso de mecanizado industrial de *Inconel 718*.

8.1. Presupuesto

- **Autor:** Miguel Martos Nieto
- **Departamento:** Ingeniería Mecánica
- **Descripción:** Simulación numérica del proceso de mecanizado con corte ortogonal del material Inconel 718
- **Duración:** 4 meses (marzo – junio de 2017)
- **Descripción de los recursos utilizados:**

Recurso	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Equipo informático	Ordenador para simulación y cálculo	1	1.000 €	1.000 €
Equipo informático	Licencia ABAQUS	1	9.000 €	9.000 €
Personal	Personal adscrito al proyecto (tutor + estudiante)	1	5.000 €	5.000 €

- **Resumen de costes:**

Tipo de recurso	Coste total
Equipos informáticos	10.000 €
Personal	5.000 €
Subtotal (Base imponible)	15.000 €
I.V.A (21%)	3.150 €
TOTAL	18.150 €

8.2. Impacto ambiental

El impacto ambiental generado en la industria de los procesos de mecanizado está relacionado con el empleo de fluidos de corte en el contacto pieza-herramienta. El uso de ese fluido tiene como finalidad refrigerar, lubricar y evacuar la viruta o limaduras generadas durante el proceso. En el momento en el que el fluido pierde estas propiedades

se convierte en un residuo en forma de efluentes líquidos y residuos sólidos. Los fluidos de corte más utilizados son: aceites minerales, aceites animales, aceites emulsionables (aceites minerales con agua en distintas proporciones), aceites vegetales, aceite con bisulfuro de molibdeno (buena lubricación a presiones elevadas) y, por último, también se utilizan mezclas de los anteriores.

Esta variabilidad permite muchas oportunidades de mejora ambiental en los procesos de la industria del mecanizado de piezas, sobre todo con respecto a la prevención y reducción de la contaminación en origen.

También hay que tener en cuenta en el impacto ambiental del proceso, aunque con menor peso, los siguientes elementos:

- a) Consumo eléctrico de la maquinaria
- b) Aguas residuales de limpieza de la planta
- c) Emisión de nieblas de aceite
- d) Generación de ruido de la maquinaria

Bibliografía

- [1] <http://www.specialmetals.com/>. Última fecha de consulta: mayo de 2017
- [2] <http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20718.pdf>. Última fecha de consulta: mayo de 2017
- [3] Brown C.S, Kobayashi T, Simons J.W, Shockey DA. Plastic flow behavior of Inconel 718 under dynamic shear loads. International Journal of Impact Engineering 2008; 35; 389-396.
- [4] <http://w3.mecanica.upm.es/~pantolin/membranas.html> Última fecha de consulta: mayo de 2017
- [5] <http://cadtech.es/webinar-analisis-datos-simulia-catia-v5-analisis/> Última fecha de consulta: mayo de 2017
- [6] Hosaeus H, Kaschnitz E, Pottlacher G, Seifter A. Thermophysical properties of solid and liquid Inconel 718 alloy. ECTP 2001; 33; 379-468
- [7] Erice B, Gálvez F, Pérez-Martín MJ. An experimental and numerical study of ductile failure under quasi-static and impact loadings of Inconel 718 nickel-base superalloy. International Journal of Impact Engineering 2014; 69; 11-24.
- [8] Devillez A, Dominiak S, Dudzinski D, Larrouquere D, Schneider F. Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools. Wear 2007; 262; 931-942.
- [9] Devillez A, Dominiak S, Dudzinski D, Le Coz G. Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity. Journal of Materials Processing Technology 2011; 211; 1590-1598.
- [10] Devillez A, Dudzinski D, Moufki A, Larouquère D, Zerrouki, V, Vigueau, J. A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy. International Journal of Machine Tools & Manufacture 2004; 44; 439-456.
- [11] Fang N, Wu Q. A comparative study of the cutting forces in high speed machining of Ti-6Al-4V and Inconel 718 with a round cutting edge tool. Journals of Materials Processing Technology 2009; 209; 4385-4389

[12] Kose E, Kurt A, Seker U. The effects of the feed rate on the cutting tool stresses in machining of Inconel 718. *Journals of Materials Processing Technology* 2008; 196; 165-173.

[13] Zhenchao Y, Dinghua Z, Xinchun H, Changfeng Y, Yongshou L, Ying M. The simulation of cutting force and temperature field in turning of Inconel 718. *Key Engineering Materials* 201; 458; 149- 154.

[14] <https://www.epo.org/law-practice/legal-texts/html/epc/2016/e/ar52.html> Última fecha de consulta: junio de 2017

[15] <https://www.epo.org/law-practice/case-law-appeals/recent/t051227ep1.html> Última fecha de consulta: junio de 2017